

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“ANÁLISIS TÉRMICO Y MODAL DE UN CONVERTIDOR CATALÍTICO
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO”**

NESTOR IVAN MARTÍNEZ RIVERA

**PRESENTA TESIS
EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“ANÁLISIS TÉRMICO Y MODAL DE UN CONVERTIDOR CATALÍTICO
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO”**

NESTOR IVAN MARTÍNEZ RIVERA

**PRESENTA TESIS
EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“ANÁLISIS TÉRMICO Y MODAL DE UN CONVERTIDOR CATALÍTICO
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO”**

NESTOR IVAN MARTÍNEZ RIVERA

**PRESENTA TESIS
EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis "Análisis térmico y modal de un convertidor catalítico mediante el método de elemento finito" realizada por el alumno Nestor Ivan Martínez Rivera con número de matrícula 1193726 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis



Dra. Martha Patricia Guerrero Mata

Asesor



Dr. Jose Santiago Cruz Bañuelos

Revisor



Dra. Adriana Salas Zamarripa

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de estudios de posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Julio del 2015

Dedicatoria

A mis padres

A mis hermanos

A mis amigos

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero brindado durante esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

A la compañía KATCON S.A de C.V. Por el apoyo y la colaboración.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero Mata por creer en mí y ser mi guía durante toda mi maestría.

A la Dra. Adriana Salas por su gran apoyo y sus consejos.

A todos los doctores del programa DIMAT por su paciencia durante las clases y por su apoyo incondicional.

A mis compañeros Francisco, Artabán, Agustín, Azael, Óscar, Carlos, en general a todos los del DIMAT.

A mis padres por su apoyo.

A mis queridos hermanos, por su cariño y por estar conmigo siempre en las buenas y en las malas.

A mi novia Dana Aguirre por todo su apoyo.

Muchas gracias.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>4</i>
1.1 Introducción	4
1.2 Hipótesis	7
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivos específicos	8

CAPÍTULO 2

<i>CONVERTIDORES CATALÍTICOS</i>	<i>9</i>
2.1 Introducción	9
2.2 Desarrollo de los convertidores catalíticos	9
2.3 Elementos del convertidor catalítico	12
2.3.1 Componentes que realizan la catálisis en motores a gasolina y diésel	13
2.3.2 Componentes para la disipación de calor	14
2.3.3 Componentes para la continuidad del sistema	14
2.3.4 Turbocompresor y colector de escape	16
2.3.5 Soporte principal	17
2.4 Funcionamiento del convertidor catalítico	17
2.5 Características importantes en el funcionamiento del convertidor catalítico	20
2.5.1 Aspectos térmicos	21
2.5.2 Aspectos mecánicos	23
2.6 Ventajas y desventajas de un convertidor catalítico	26
2.7 Nuevas tecnologías en convertidores catalíticos	27

CAPÍTULO 3

<i>MATERIALES EMPLEADOS EN CONVERTIDORES CATALÍTICOS</i>	<i>30</i>
3.1 Introducción	30

3.2 Materiales metálicos	30
3.2.1 AISI 409 Y AISI 441	31
3.2.2 Hierro fundido	33
3.2.3 AISI 1008	34
3.3 Materiales cerámicos	35
3.3.1 Carburo de Silicio	36
3.4 Materiales compuestos	37
3.4.1 Interam 100	39
3.4.2 Cordierita	40
3.4.3 Saffil E200	42
 CAPÍTULO 4	
TEORÍA DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO	43
4.1 Introducción	43
4.2 Historia del método de elemento finito	45
4.3 Desarrollo del método de elemento finito	48
4.4 Formulación matemática para el método de elemento finito	52
4.4.1 Método de aproximación directa	52
4.4.2 Método de Ritz	53
4.4.3 Método de residuos ponderados	56
4.5 MEF para el análisis modal y térmico de un convertidor catalítico	58
4.5.1 Extracción de valores característicos	58
4.5.2 Transferencia de calor	61
4.5.2.1 Cavidad de radiación	65
4.5.2.2 Conductividad en elementos tipo armazón (Shell)	69
4.6 Ventajas y desventajas	73
4.7 Evolución del MEF en el ramo automotriz	75
 CAPÍTULO 5	
EXPERIMENTACIÓN	78
5.1 Introducción	78
5.2 Metodología	78
5.3 Detalles de geometría y discretización del convertidor catalítico	80

5.4 Análisis térmico por medio del MEF.	88
5.5 Análisis modal a temperatura ambiente y de funcionamiento por medio del MEF	92
CAPÍTULO 6	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
6.1 Introducción	95
6.2 Análisis Térmico	95
6.3 Análisis Modal	101
6.4 Correlación	111
6.4.1. Prueba de oscilaciones resonantes	111
6.4.2. Prueba térmica	114
CAPÍTULO 7	
CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	118
7.1 Conclusiones	118
7.2 Trabajo a Futuro	119
LISTADO DE FIGURAS	121
LISTADO DE TABLAS	125
REFERENCIAS	127

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En la actualidad el componente principal del sistema de escape en los vehículos es el convertidor catalítico. Este ayuda a eliminar los gases nocivos expelidos por el motor de combustión interna para transformarlos en gases inertes hacia el medio ambiente, de ahí la importancia de seguir desarrollando convertidores catalíticos de mejor calidad y de manufactura más económica y amigable con el medio ambiente [1,2].

El convertidor catalítico es considerado, a la fecha, como el dispositivo más eficiente para reducir las emisiones contaminantes de los gases de combustión generados por los motores de los vehículos y es considerado en la industria automotriz como uno de los mayores éxitos ambientales del siglo XX [1,3]. Sin embargo, aún se continúan desarrollando nuevas tecnologías para satisfacer los continuos cambios en las normas ambientales de la emisión de gases nocivos.

Uno de los problemas principales en la industria automotriz es la generación de gases nocivos, debido a que el proceso de combustión ideal no es fácil de lograr. La combustión incompleta se presenta en la mayoría de los motores de combustión interna, dando como resultado una emisión de gases como; monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x) [4-8].

El proceso de eliminación de gases nocivos, consiste en la transformación de estos productos en gases inertes hacia el medio ambiente utilizando

convertidores catalíticos que consisten en combinaciones de metales preciosos como Platino (Pt), Paladio (Pd) y Rodio (Rh) dentro de una matriz cerámica [7,9].

En la actualidad el convertidor catalítico más utilizado para automóviles con motor a gasolina es llamado de tres vías, debido a que logra eliminar los tres contaminantes principales en un solo compartimiento mediante reacciones de oxidación y reducción transformando estos compuestos en Nitrógeno (N_2), Agua (H_2O) y Dióxido de Carbono (CO_2) [6,8,9]. Por otra parte, los automóviles con motor a diésel también emplean este convertidor catalítico, sin embargo se ve limitado en su proceso de transformar estos gases nocivos, ya que solo se completa el proceso de oxidación debido a la baja temperatura a la que ocurre la combustión, logrando solo eliminar el CO y HC [10], sin transformar los NO_x ni eliminar las partículas suspendidas (PM), estas impurezas generadas en los motores a diésel obligan a utilizar un filtro a la salida del convertidor catalítico con la finalidad de atrapar las partículas y seguir cumpliendo con los cambios en las normas ambientales establecidas. En la actualidad se están desarrollando tecnologías para la eliminación de los NO_x en motores a diésel, por lo que la industria automotriz sigue en constante desarrollo de convertidores catalíticos aptos para estos motores [5,9-12].

Hoy en día, la industria automotriz requiere contar con mejores diseños y el uso adecuado de materiales que sean confiables durante toda la vida útil del vehículo. El sistema de escape requiere que los componentes no muestren ninguna falla antes de los 200,000 kilómetros [5,6], esto conduce a alta resistencia mecánica, térmica y química de los convertidores catalíticos.

Esta investigación forma parte de la estrategia de muchas empresas que fabrican y diseñan convertidores catalíticos como KATCON S.A. de C.V., empresa dedicada al diseño y manufactura de convertidores catalíticos, para la optimización y validación de sus procesos. El objetivo de éste trabajo fue

analizar la distribución de temperaturas y frecuencias naturales de los convertidores catalíticos bajo condiciones ideales de trabajo utilizando el método de simulación por elemento finito y así localizar los puntos de concentración de temperatura y de las frecuencias naturales del convertidor catalítico que puedan provocar resonancia, con la finalidad de evitar una falla prematura.

Uno de los aspectos más importantes del método de elemento finito (MEF) es su confiabilidad y versatilidad, ya que puede ser utilizado de manera confiable en programas asistidos por computadora. En las recientes décadas se han desarrollado paquetes de simulación poderosos que utilizan el MEF, con estos paquetes se pueden resolver diversos modelos matemáticos en una forma aproximada, además de obtener una visualización y animación gráfica que ayudan a interpretar los resultados para posteriormente ser comparados con los resultados de análisis físicos realizados en los laboratorios. Debido a esto, la modelación y simulación de procesos por MEF es cada día más utilizada e indispensable en el estudio de todas las áreas de ingeniería en la industria automotriz.

Dentro de esta investigación se realizaron y evaluaron tres modelos matemáticos:

- Modelo modal a temperatura ambiente con el que se verificó que el sistema del convertidor catalítico no entre en resonancia y éste pueda sufrir alguna falla prematura.
- Modelo térmico, donde se calculó la transferencia de calor cuando los gases de escape pasen a través del convertidor catalítico.
- Modelo modal en caliente el cual se realizó bajo las temperaturas obtenidas del modelo térmico para evaluar los efectos de las frecuencias naturales a la temperatura de funcionamiento.

Los paquetes comerciales ABAQUS/CAE, HYPERMESH y NX fueron utilizados para el desarrollo y análisis de los modelos anteriormente mencionados.

1.2 Hipótesis

Las ecuaciones constitutivas a resolver para obtener la distribución de temperaturas y frecuencias naturales en el convertidor catalítico por medios analíticos son altamente complejas por lo que se evaluará el MEF como herramienta confiable para obtener un resultado aproximado empleando métodos numéricos.

1.3 Justificación

En la actualidad el sistema conformado por los convertidores catalíticos es objeto de constante desarrollo. Conocer las vibraciones naturales, el perfil de temperaturas y los esfuerzos alcanzados en el sistema permitirá un mejor rendimiento y optimización de los componentes del sistema en busca del costo óptimo.

Otra rama de estudio son los materiales empleados en dicho sistema, debido a su elevado costo es importante encontrar el diseño adecuado que permita disminuir estos costos, mejorar el rendimiento y los niveles de seguridad del vehículo.

El análisis por MEF es una herramienta muy utilizada en la industria automotriz, debido a los altos costos que alcanzan los arreglos experimentales del sistema. El MEF permite simular el proceso con diferentes materiales y espesores sin tener que realizar las pruebas físicamente,

ayudando así a facilitar la búsqueda de un mejor desempeño de los convertidores catalíticos.

1.4 Objetivos

Evaluar y validar la distribución de temperaturas y frecuencias naturales de un convertidor catalítico sujeto a condiciones reales de trabajo utilizando el método de elemento finito como herramienta de simulación del proceso.

1.4.1 Objetivos específicos

- Desarrollo de metodología para analizar el comportamiento de un convertidor catalítico mediante el método de elemento finito.
- Determinar las condiciones de frontera críticas del convertidor catalítico para cada uno de los modelos.
- Desarrollar el mallado óptimo de la complicada geometría de un convertidor catalítico.

CAPÍTULO 2

CONVERTIDORES CATALÍTICOS

2.1 Introducción

En este capítulo se detallará la evolución de los convertidores catalíticos desde sus inicios en motores a gasolina hasta la actualidad en donde se proponen como un medio de disminución de emisiones en motores a diésel. Aunado a esto se describirá su funcionamiento resaltando la importancia de los aspectos térmicos y mecánicos que puedan afectar la vida útil del convertidor catalítico.

También, en este capítulo se describirán los componentes principales de los convertidores catalíticos, así como las ventajas y desventajas de estos sistemas, además de las nuevas tecnologías utilizadas para mejorar su desempeño dentro de la industria automotriz.

2.2 Desarrollo de los convertidores catalíticos

El convertidor catalítico es un dispositivo instalado en el sistema de escape de los automóviles, Figura 2.1, el cual está compuesto principalmente de un filtro tipo panal normalmente fabricado de cerámica. El convertidor catalítico contiene un sustrato, el cual debe cumplir con la máxima relación posible entre superficie y volumen para ejecutar con mayor éxito la transformación de los gases nocivos expelidos por el motor de combustión interna.

Este sustrato es impregnado con una emulsión que incorpora el material catalítico, dicho material es una mezcla de metales preciosos como el Pt, Rh y

Pd en diferentes mezclas y proporciones dependiendo de tipo y tamaño de motor [8].

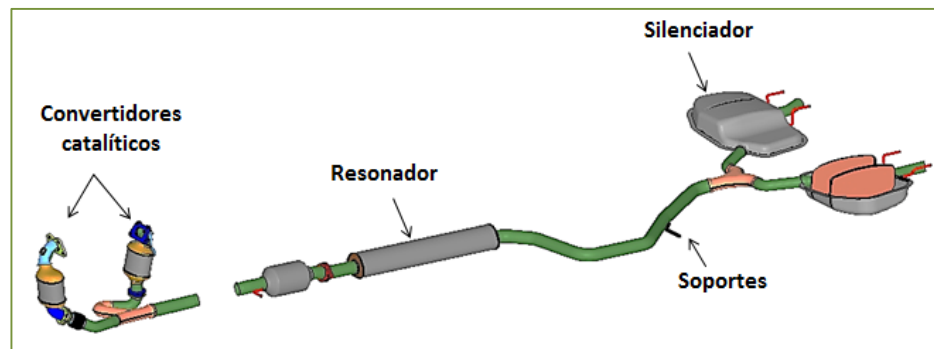


FIGURA 2.1. SISTEMA DE ESCAPE COMPLETO DE UN AUTOMÓVIL.

Durante la década de los cincuenta el problema de contaminación se incrementó, producto de un alza en la población y el número de automóviles en circulación. Ante esta problemática se concluyó que el automóvil era uno de los principales contribuyentes de este fenómeno. Por lo cual, en la década de los sesenta las normas para el control de emisiones estaban empezando a ser ejecutadas en el estado de California [6].

La introducción de los convertidores catalíticos en los sistemas de escape se produjo a finales de 1970 en California, EUA. En ese periodo sólo se dio prioridad a reducir el porcentaje de emisiones de HC y CO. Años más tarde se desarrolló el convertidor catalítico de tres vías, llamado así por tratar eficazmente los tres principales gases nocivos expelidos en el motor a gasolina, con la finalidad de transformar estos últimos en gases inertes para el medio ambiente como N_2 , CO_2 y H_2O . Una de las claves para la exitosa introducción comercial de los convertidores catalíticos de tres vías fue la invención del sensor de oxígeno en 1981, debido a que contribuyó en una lectura de gases más precisa. Durante las próximas décadas las normas de emisiones permitidas se adoptaron en el resto de los Estados Unidos, Europa y Japón [7,13].

En 1960 normalmente los automóviles producían 100 gramos de CO y HC por cada milla recorrida. En la actualidad con los nuevos avances en los convertidores catalíticos se ha logrado reducir de 100 gramos de gases expelidos a solo 2 gramos por cada milla recorrida, esto debido a más de tres décadas de investigación y desarrollo, aunado a las estrictas normas de calidad en cuanto a emisiones de gases nocivos al medio ambiente [7].

La Figura 2.2 representa como se fue expandiendo el uso del convertidor catalítico en el mundo siendo los primeros EUA, Canadá y Japón [13].

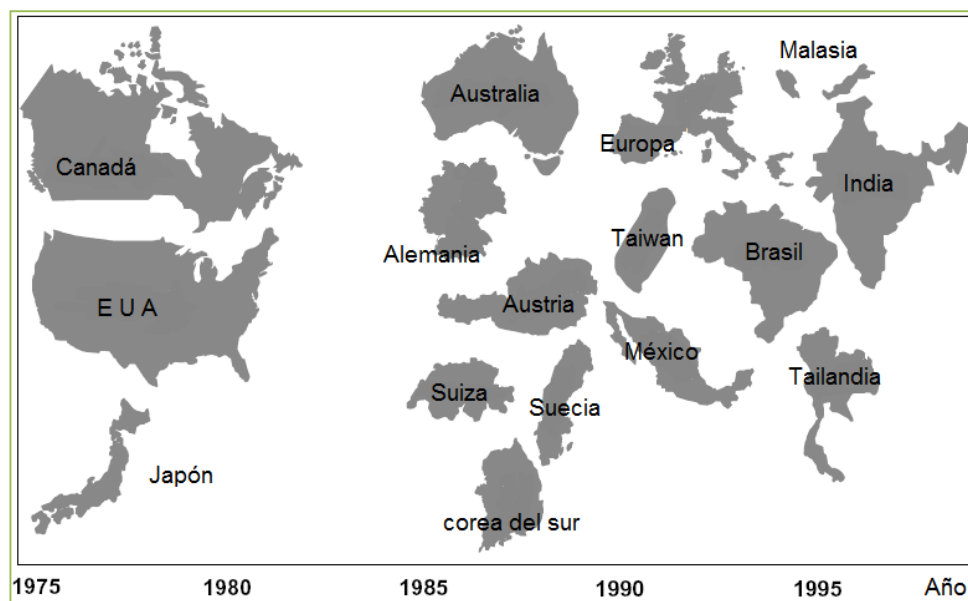


FIGURA 2.2. DESARROLLO DEL USO DE LOS CONVERTIDORES CATALÍTICOS A TRAVÉS DE LOS AÑOS [13].

La diferencia entre los dos tipos de convertidores catalíticos está regida por el tipo de combustible que es empleado para la combustión en el motor del automóvil. Como ha sido mencionado anteriormente para el motor a gasolina se emplea el convertidor catalítico de tres vías. Este convertidor catalítico es el más utilizado en el mundo por la gran eficiencia que tiene de realizar la oxidación y reducción dentro del mismo panel, mientras que en los motores a diésel el convertidor de tres vías es solamente utilizado para generar la oxidación el cual ayuda a reducir las emisiones de los HC, CO sin tener éxito en la transformación del NOx ni en las partículas suspendidas.

Los motores a diésel además deben de incluir en la mayoría de sus sistemas un filtro para eliminar las partículas suspendidas que son generados por el combustible [14]. En la norma EURO 5, la eliminación del NOx en motores a diésel no es tan estricta, sin embargo a partir de la norma EURO 6 los NOx deberán reducirse hasta un 55% con respecto a la norma anterior [15].

Las emisiones de NOx en motores a diésel no pueden transformarse con convertidor de tres vías ni con el filtro de partículas, por lo cual se necesita emplear convertidor catalítico de reducción selectiva (SCR por sus siglas en inglés), además de la inyección de urea para transformar los NOx en H₂O y N₂ [16]. Por consecuencia en la actualidad la industria automotriz sigue desarrollando nuevas tecnologías para cubrir los requerimientos de las futuras normas.

2.3 Elementos del convertidor catalítico

El convertidor catalítico se encuentra expuesto a altas temperaturas de operación y a altos niveles de esfuerzos, lo anterior conlleva a separar el sistema en distintos componentes como lo son: componentes que realizan la catálisis, componentes para la disipación de calor, componentes para la continuidad del sistema, soporte principal, entre otros. En la Figura 2.3 se muestran los elementos del convertidor catalítico de un motor a gasolina.

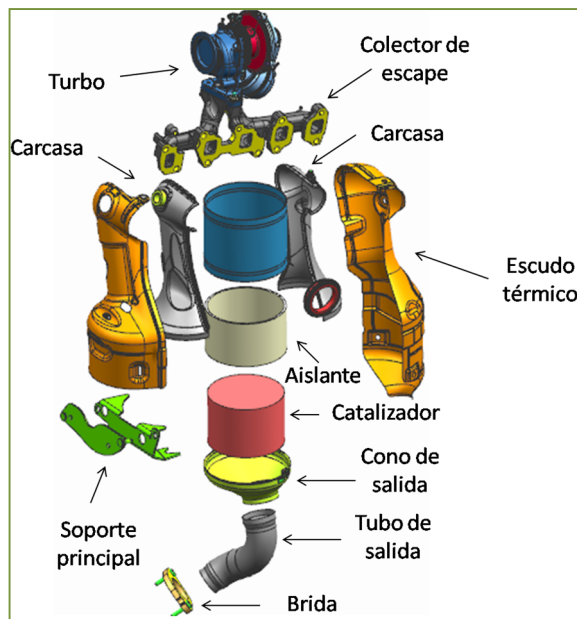


FIGURA 2.3. ELEMENTOS DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO DE UN MOTOR A GASOLINA DISEÑADO POR KATCON LUXEMBURGO.

A continuación se detallarán los componentes principales empleados en los convertidores catalíticos, las funciones que realizan cada uno de ellos y de las distintas formas en que se diseñan para el buen funcionamiento del convertidor catalítico.

2.3.1 Componentes que realizan la catálisis en motores a gasolina y diésel

Los componentes empleados para la catálisis son los más importantes de los sistemas de escape de los automóviles por ser los responsables de transformar los gases nocivos. En los motores a gasolina la cordierita es la que lleva a cabo con gran éxito la catálisis. Este componente se ha utilizado durante décadas teniendo resultados muy favorables en la transformación de los gases, por tal razón se comenzó a emplear en los motores a diésel pero debido a la baja temperatura que se alcanza en la combustión en estos motores, la cordierita no fue tan eficiente como en los motores a gasolina, debido a que no logra reducir significativamente la cantidad de NOx que producen estos motores.

Esto limitó el uso de los motores diésel en muchos países a pesar de la economía del combustible, además de la desventaja de generar partículas suspendidas, lo cual ocasiona incluir un filtro en los sistemas diésel para así eliminar dichas partículas. El carburo de silicio es el material empleado como filtro de partículas. Actualmente, se emplea un sistema SCR para transformar los NO_x en N₂ y H₂O en este tipo de motores.

2.3.2 Componentes para la disipación de calor

El aislante térmico es un componente esencial para la disipación de calor generado por los gases de escape, principalmente para la comodidad de los pasajeros y la durabilidad de todos los componentes del convertidor catalítico. Este se puede encontrar alrededor del convertidor y del filtro de partículas y algunas veces en los conos de salida. Los principales materiales empleados como aislantes son: INTERAM 100, UNIFRAX, SAFFIL E200, entre otros.

Otro de los componentes que es empleado es el escudo térmico. La mayoría de los convertidores catalíticos incluyen a estos componentes por la gran funcionalidad como disipador térmico. La temperatura alcanzada por los gases de escape, así como el tipo y espesor de los aislantes utilizados determina el escudo térmico seleccionado. El escudo se empleará si se desea obtener una temperatura aún más baja para proteger de degradación prematura de los demás componentes.

2.3.3 Componentes para la continuidad del sistema

Mantener la continuidad del sistema es un punto importante en el convertidor catalítico por la necesidad de conducir los gases de escape desde el motor hasta el momento de ser expelidos al medio ambiente.

La carcasa es el componente más importante en la continuidad del sistema por tener como propósito envolver con el material aislante al convertidor catalítico, filtro de partículas diésel y al SCR, estos últimos dos solo en motores a diésel, con la finalidad de protegerlos de golpes o daños que puedan ser generados por componentes adyacentes del automóvil, esto se logra por la resistencia mecánica que brindan los aceros. El acero inoxidable ferrítico es el material empleado para la carcasa por la facilidad de adaptarse a los complicados diseños del convertidor catalítico, además de su gran resistencia a choques térmicos y a la corrosión. Los soportes principales en la mayoría de los casos están soldados a la carcasa para proporcionar una mayor rigidez.

Los componentes empleados para la continuidad del sistema deben cumplir con el diseño perfecto para no generar una caída de presión y lograr mantener un flujo constante de los gases. En el convertidor catalítico se emplean distintos conos por la necesidad de tener que adaptarse al espacio y forma dentro del automóvil. Los conos (véase Figura 2.3) se dividen en conos de entrada al sistema de catálisis, conos intermedios que sirven como conectores entre la cordierita y el filtro de partículas (aunque este tipo de conos solamente es empleado en motores a diésel) y conos de salida por estar ubicados después de los componentes de catálisis. Algunas veces por la dificultad en la manufactura de los conos es necesario diseñarlos en dos secciones que se plieguen por medio de una soldadura y/o abrazaderas.

La funcionalidad de las bridas se basa en dar la continuidad de los sub-ensambles en lugares donde es imposible aplicar soldadura, el acero al carbón 1008 o 1010 es el material que cumple con los requerimientos de temperatura y resistencia mecánica para soportar las vibraciones generadas por el automóvil, evitando el crecimiento y propagación de grieta asegurando la conectividad del sistema, además estos aceros al carbón tienen un bajo costo comparados con aceros inoxidables.

Los tubos de un convertidor catalítico canalizan los gases de combustión a través del sistema de escape hasta que son descargados a la atmósfera, una vez transformados en compuestos inertes por los componentes de catálisis. La resistencia que tienen los tubos evita la nucleación y propagación de grietas, sitios en donde puedan escapar los gases nocivos. Estos componentes logran adquirir gran cantidad de formas para ser acoplados en los automóviles.

Los tubos y los conos están elaborados de aceros inoxidable ferríticos como AISI 409 y AISI 441, ya que son materiales que ofrecen una alta resistencia a la corrosión a altas temperaturas, resistencia mecánica y su gran ductilidad, hacen de ellos los materiales más utilizados en el sistema de continuidad en convertidores catalíticos.

2.3.4 Turbocompresor y colector de escape

El colector de escape es el primer componente que tiene contacto con los gases y en la actualidad el material más empleado es el hierro fundido por su facilidad para producirlo y su bajo costo. Uno o varios colectores se emplean en el convertidor catalítico, la cantidad de colectores de escape está en función del número de cilindros y la arquitectura del motor; en el caso de cuatro cilindros se utiliza solo un colector con cuatro salidas, en cambio en el motor de seis y ocho cilindros se emplean dos colectores con tres o cuatro salidas cada uno según sea el diseño del motor. El diseño del colector de escape tiene una gran influencia en la durabilidad, ya que puede ser sumamente limitada debido a los altos esfuerzos termomecánicos encontrados en la estructura.

En la actualidad se están desarrollando colectores de escape con nuevos materiales como Ni-resist para dar una mayor durabilidad y un mejor desempeño al automóvil.

El proceso del turbocompresor es convertir la energía de residuos desde el colector de escape en el aire comprimido que se introduce en el motor. Esto permite un aumento en la potencia del motor mejorando así la eficiencia global del proceso de combustión. Un turbocompresor se compone de una turbina y un compresor conectado por un eje común con el apoyo de un sistema de rodamientos [17]. Las ventajas del turbocompresor son el aumento en la potencia del motor, menor gasto de combustible y compensación por altitud [18]. Las aleaciones de aluminio se utilizan normalmente para la fabricación del turbocompresor debido a su excelente combinación de precio y propiedades mecánicas.

2.3.5 Soporte principal

Los soportes son los responsables de sujetar al convertidor catalítico, por lo cual necesitan una gran resistencia al esfuerzo y la deformación. El material que es comúnmente empleado para este tipo de soportes es el acero inoxidable ferrítico, aunque hoy en día se están elaborando soportes de hierro fundido o acero al carbón debido a su bajo costo y su buen desempeño. El buen diseño del soporte es crítico para optimizar los costos sin reducir los requerimientos de seguridad del automóvil.

2.4 Funcionamiento del convertidor catalítico

Como se ha mencionado anteriormente, la función principal del convertidor catalítico es la transformación de los gases de escape nocivos, generados por el proceso de combustión a un punto adecuado donde puedan ser liberados a la atmósfera [1]. Otras funciones del convertidor catalítico se añaden a fin de cumplir con los requisitos del fabricante de automóviles, tales como: la reducción del ruido del tubo de escape, los gases de escape después del tratamiento, la fiabilidad de lograr la transferencia de calor la cual está

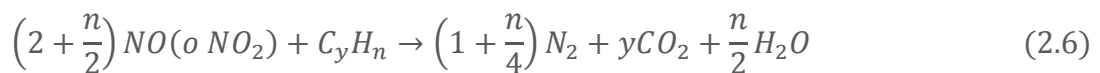
delimitada por los componentes circundantes, los cuales pueden sufrir degradación por la temperatura [19].

La transformación de los gases nocivos se rige bajo las reacciones químicas básicas de oxidación y reducción a temperaturas por arriba de los 800°C, esta temperatura es alcanzada por los gases de escape durante el funcionamiento del convertidor catalítico en motores a gasolina solamente [20]. Para motores a diésel la temperatura de combustión es por debajo de 700°C [19,20]. La oxidación es el proceso de convertir las emisiones de CO e HC en compuestos inertes como CO₂ y H₂O.

A continuación se muestran las reacciones de oxidación siendo la ecuación (2.1) para HC y las ecuaciones (2.2, 2.3) corresponden al CO [13,21].



Mientras las reacciones de reducción se emplean para la transformación de NO_x a moléculas de N₂ y H₂O esta reducción se rige bajo las siguientes ecuaciones (2.4, 2.5, 2.6), [13,21].



Las reacciones de reducción hasta el día de hoy solo se aplican en motores a gasolina ya que por su alta temperatura puede transformar los NOx en gases inertes dentro del mismo convertidor de tres vías. En el caso de motores a diésel las reacciones de reducción se llevan a cabo mediante el sistema SCR.

La Figura 2.4 muestra el esquema del proceso químico que ocurre dentro de los convertidores catalíticos de motores a gasolina donde se representa la entrada de los gases nocivos y su transformación en gases inertes.

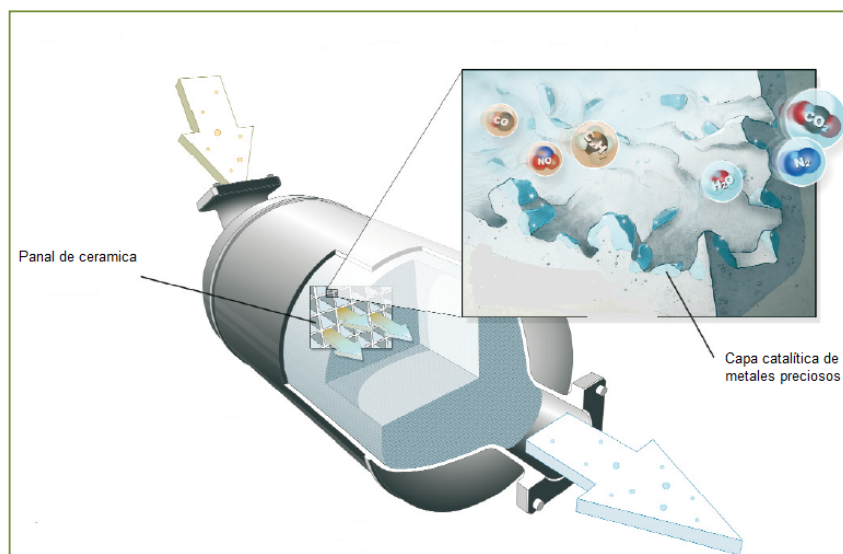


FIGURA 2.4. REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE CONVERSIÓN CATALÍTICA EN MOTORES A GASOLINA [8].

Existen otros factores importantes que se deben cuidar durante el funcionamiento del convertidor catalítico para evitar perjudicar a otro automóvil o las funciones del mismo, a continuación se presentan estos factores [19]:

Comodidad de los pasajeros: El sistema de escape puede ser una fuente importante de ruido que se transmite al automóvil por medio de la vibración, así como fugas de gas que deberán ser controladas para asegurar el confort de los pasajeros.

Potencia del motor: Puede ser afectada por los gases de escape del sistema y las caídas de presión, lo cual conlleva a no alcanzar la máxima potencia y elevar el consumo de combustible.

Vibraciones: Toda la línea de escape está conectada a la carrocería del vehículo y al motor a través de los soportes y elementos de suspensión. Estas conexiones deben ser diseñadas de excelente manera para minimizar las vibraciones transmitidas al automóvil.

Emisiones de calor: El calor se transfiere por conducción, convección y radiación a los componentes que rodean al convertidor catalítico, por lo cual los componentes cercanos, tales como: cables, mangueras, entre otros, pueden ser dañados o incluso degradados por las altas temperaturas alcanzadas en el convertidor.

Embalaje: Es el arreglo del sistema de escape el cual no deberá tener interferencia con otros componentes del automóvil.

2.5 Características importantes en el funcionamiento del convertidor catalítico

En la sección 2.4 se explicó el funcionamiento del convertidor catalítico, sin embargo no se definieron los mecanismos térmicos que se presentan en el convertidor tales como: conducción, convección y radiación esto por la parte térmica. Además, mecánicamente el convertidor experimenta diferentes tipos de vibración que deben ser controladas para evitar la resonancia de los componentes. A continuación se describirán algunos de estos aspectos térmicos y mecánicos que deben de tomarse en cuenta al diseñar un sistema de escape.

2.5.1 Aspectos térmicos

Para entender mejor el funcionamiento del convertidor catalítico es importante comprender los distintos mecanismos de transferencia de calor que este experimenta durante su funcionamiento, los cuales se mencionan a continuación:

Conducción. Se define como el proceso de transferencia de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso debido al movimiento aleatorio de las moléculas y átomos sin existir un movimiento neto de masa del material [22].

Al existir una diferencia de temperatura, esta energía es transferida de los átomos o moléculas con mayor energía a los átomos o moléculas con menor energía como resultado de su interacción. En el caso particular de los sólidos el mecanismo de transferencia de calor se representa por la amplitud de vibración de los átomos o moléculas que a su vez es proporcional a la temperatura. Su comportamiento está regido por la ley de Fourier y se representa en forma general como [22-24]:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

donde, q_x es el flujo de calor por unidad de área en las tres direcciones y sus unidades son W/m^2 . dT/dx es el gradiente de temperatura por unidad de longitud en K/m . La k es la conductividad térmica del material en W/mK , esta es una propiedad distinta en cada material.

Convección. Se define como el transporte de energía de una región a otra debido al movimiento macroscópico de un fluido (líquido o gaseoso) junto con la conducción de calor dentro del fluido. Típicamente existe una superficie sólida y un fluido adyacente en movimiento en este tipo de transferencia de calor. Existen dos tipos de transferencia de calor por convección.

Cuando el movimiento del fluido ocurre debido a un cambio de densidades provocado por una diferencia de temperaturas el fenómeno es llamado convección natural o libre. Si el movimiento del fluido se debe a una fuente externa tales como bombeo, soplos de aire, entre otros, el fenómeno es llamado convección forzada. La transferencia de calor por convección también puede ocurrir en los procesos de ebullición y condensación. El flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperaturas y está regido por la ley de enfriamiento de Newton que se expresa con la siguiente relación empírica [22-24]:

$$q_x = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

donde, q_x nuevamente es el flujo de calor por unidad de área en W/m^2 , T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido adyacente, h es el coeficiente de transferencia de calor en las unidades $W/m^2 K$. El coeficiente de transferencia de calor se relaciona principalmente con las propiedades fundamentales de transporte tales como la conductividad térmica o las propiedades del flujo. Esto lleva a aplicar conceptos de mecánica de fluidos en la que se tienen que resolver las ecuaciones de continuidad, de conservación de momento y de conservación de energía en forma conjunta haciendo su obtención relativamente complicada. Sin embargo, existen relaciones empíricas para obtener el coeficiente de transferencia de calor en función de la geometría del sistema, de la temperatura, condiciones de flujo, entre otras variables.

Radiación; Es la energía transmitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en la configuración electrónica de los átomos y moléculas. La combinación de la ley de Stefan-Boltzmann y la ley de Kirchhoff la cual permite obtener el flujo de calor por radiación por unidad de área mediante la siguiente ecuación [22-24]:

$$q_x = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.9)$$

donde, ε es la emisividad y σ es la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$. El flujo de calor por radiación depende de la diferencia de las temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia.

Una vez que se conocen los mecanismos de transferencia de calor es necesario diseñar modelos que logren disipar las altas temperaturas alcanzadas por los convertidores catalíticos y que deben ser controladas para obtener una distribución de temperaturas adecuadas para que los componentes no sufran algún daño y que los pasajeros del automóvil estén en confort.

Los esfuerzos termomecánicos son causados por ciclos o choques térmicos generados por las variaciones bruscas de temperatura en los gases de escape que se producen durante las aceleraciones o desaceleraciones repentinas. Los choques térmicos externos son causados por agua al momento de llover o de quedar estancada en carreteras a causa de lluvias. En ambos casos los gradientes de temperaturas pueden producir fatiga térmica o generar corrosión prematura en los componentes [19].

Uno de los impedimentos para obtener una buena distribución de temperatura es la dificultad para proteger los componentes que rodean al convertidor catalítico o el filtro de partículas debido a que el espacio disponible en el compartimiento es muy limitado.

2.5.2 Aspectos mecánicos

Una vibración puede considerarse la oscilación de un objeto alrededor de una posición de equilibrio, siendo la posición de equilibrio el punto al que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. El movimiento vibratorio de un cuerpo entero, se puede describir completamente como la combinación de seis tipos diferentes de movimiento individual, siendo estos, tres de translación y tres de rotación [25].

El movimiento ondulatorio es utilizado para describir la vibración de sistemas estructurales, la vibración de un sistema implica la conversión de su energía potencial a cinética y de la energía cinética a potencial. Las vibraciones mecánicas se clasifican en libres (naturales) y forzadas. La vibración libre se usa generalmente para estudiar los modos de vibración natural de un cuerpo. La vibración forzada es el resultado de una carga externa aplicada sobre el sistema, cuando dicha carga varía en el tiempo el resultado es una carga dinámica [26].

Para la comprensión de los sistemas en vibración, es necesario determinar las frecuencias de resonancia de una estructura. Los análisis modales hoy en día son la herramienta utilizada para determinar los modos de vibración de los sistemas estructurales. En cada desarrollo de un nuevo producto o mejora de cualquier producto mecánico, el análisis dinámico es utilizado para predecir el comportamiento real. El objetivo del análisis modal en la mecánica estructural es determinar las frecuencias naturales y modos de vibrar de un objeto o estructura durante su vibración libre. Estos modos son propiedades inherentes de la estructura y son determinados por las propiedades del material (masa, amortiguamiento o rigidez) y las condiciones frontera de la estructura, cada modo está definido por una frecuencia natural [27].

La frecuencia natural de cualquier estructura física se puede modelar en forma de un número de resortes, masas y amortiguadores. Los amortiguadores absorben la energía, sin embargo los resortes y las masas no lo hacen. Un resorte y una masa interactúan uno con otro, de manera que forman un sistema que entra en resonancia a su frecuencia natural característica. Si se le aplica energía a un sistema masa-resorte, el sistema vibrará a su frecuencia natural, y el nivel de las vibraciones dependerá de la fuerza de la fuente de energía y de la absorción inherente al sistema. La frecuencia natural de un sistema masa-resorte no amortiguado se da en la siguiente ecuación [27]:

$$F = \sqrt{\frac{1}{2}\pi k/m} \quad (2.10)$$

En la ecuación 2.10 se observa que si la rigidez aumenta, la frecuencia natural también aumentará y si la masa aumenta, la frecuencia natural disminuye.

Cuando no existe pérdida alguna de energía por fricción o resistencia, el sistema se comporta como armónico simple, mientras que cualquier pérdida de energía llevará a una vibración amortiguada, esto implica que la energía se disipa en cada ciclo de vibración y para mantener el estado estable de vibración, debe existir una entrada externa de energía.

Las vibraciones procedentes del motor y del perfil de la carretera logran excitar al sistema de escape. Las cargas aplicadas de las frecuencias de resonancia pueden crear un daño o ruido excesivo, si el sistema de escape no es amortiguado correctamente, con el tiempo incluso sin ninguna resonancia la fatiga de altos ciclos pueden causar un daño tarde o temprano, dependiendo del material utilizado y de la rigidez del diseño [26]. Los esfuerzos en los soportes del convertidor catalítico deberán ser distribuidos de una manera que no generen alguna fractura en los componentes. Un convertidor catalítico es deseable que tengan una duración efectiva igual a la del automóvil o por lo menos 200,000 kilómetros.

La mayoría de los sistemas mecánicos son más complejos que una masa sencilla, ya que necesariamente se mueven como un entero, cuando son sometidos a una fuerza. Sistemas mecánicos como máquinas rotativas no tienen una rigidez infinita y tienen varios grados de flexibilidad a varias frecuencias. El movimiento resultante de una fuerza externa depende de la naturaleza de esta fuerza, y las características dinámicas de su estructura mecánica, las cuales son muy difíciles de predecir. El análisis modal por MEF, se dedica a predecir cómo una estructura reaccionará a una fuerza conocida [28].

2.6 Ventajas y desventajas de un convertidor catalítico

Como se mencionó anteriormente, los convertidores catalíticos son empleados en todos los automóviles o maquinaria pesada que sean fabricados por la industria automotriz, con la intención de reducir los gases expelidos por las combustiones incompletas y que pudieran ocasionar algún tipo de daño a terceros. En la Tabla 2.1 se muestran los beneficios obtenidos al utilizar el convertidor catalítico.

TABLA 2.1. BENEFICIOS DE UTILIZAR EL CONVERTIDOR CATALÍTICO Y FILTRO DE PARTÍCULAS [29].

SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES		
Tipo de sistema	Contaminante	Beneficios
Oxidación catalítica (cordierita)	Partículas HC, CO & NOx en motores a gasolina y HC & CO en motores a diésel	Reducciones del 90 a 100% para HC y de 88 a 99% para CO
		Reducciones de 15 a 31% para partículas
Filtro de partículas (carburo de silicio)	Partículas, CO & HC solamente en motores a diésel	Reducción del 90 al 99% en emisiones de partículas
		Reducciones del 58 a 82% para HC y del 90 a 99% para CO

La desventaja que presenta los convertidores catalíticos es su elevado costo, el cual es generado por los complicados diseños que deben ser adaptados en los espacios restringidos que son asignados en los automóviles para dichos convertidores. Sin embargo, la principal razón de su elevado costo se genera por los materiales empleados para llevar a cabo la función del convertidor catalítico, ya que se necesitan materiales especiales y con propiedades específicas.

2.7 Nuevas tecnologías en convertidores catalíticos

Como respuesta a los requerimientos ambientales y con el objetivo de realizar combustiones más eficientes, los motores en la industria automotriz se encuentran en constante desarrollo, tales cambios implican un reajuste en las condiciones de operación de los sistemas de escape, mientras que en los motores a diésel el principal reto es la reducción de los NO_x, esto mediante los sistemas SCR y el sistema de recirculación de gases de escape (EGR por sus siglas en inglés). Otra línea de investigación es la regeneración pasiva de los filtros de partículas, lo cual permitirá la calcinación de las partículas atrapadas en el filtro. Por otra parte en los motores a gasolina el cambio en el tipo de inyección representa un reajuste en el diseño del sistema de escape lo cual conlleva a emplear un filtro de partículas después del catalizador. En base a esto, el desarrollo de estas tecnologías se centra en la mejora de cada uno de estos módulos de forma independiente, SCR, EGR y/o filtro de partículas. A continuación se explica en breve cada una de estas tecnologías.

En los motores a diésel uno de los principales retos para los convertidores catalíticos es integrar un sistema SCR [30]. El sistema SCR (Figura 2.5) se ha estado desarrollando desde hace más de 3 años, sin embargo aún se sigue perfeccionando para aumentar su eficiencia y así poder cumplir con la norma EURO 6 que entró en vigencia el 1 de septiembre del 2014 [30]. Actualmente, los sistemas SCR emplean la urea de la cual se obtiene amoníaco (NH₃), compuesto que se encarga de reaccionar con los gases de escape para transformar las emisiones de NO_x.

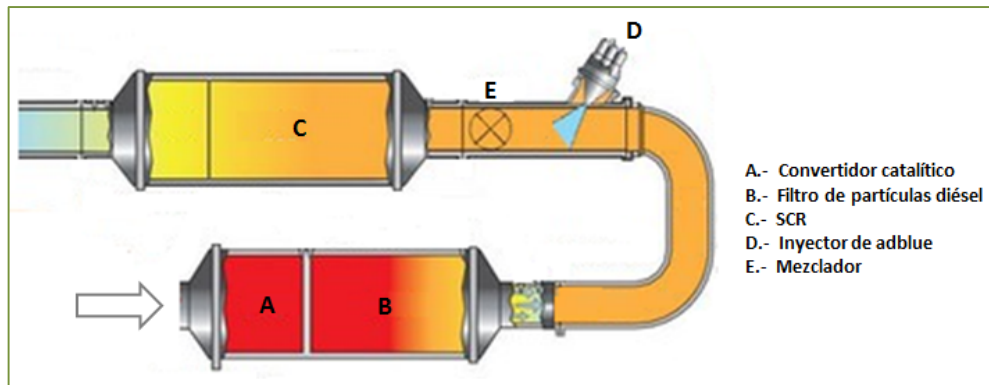


FIGURA 2.5. COMPONENTES DE UN CONVERTIDOR CATALÍTICO DE UN MOTOR A DIÉSEL CON EL SISTEMA SCR INTEGRADO.

El EGR es otra línea que se encuentra en desarrollo dentro de los automóviles con motor a diésel. El sistema EGR (Figura 2.6) tiene la finalidad de utilizar un porcentaje los gases de escape del sistema y re-direccionarlos hacia el múltiple de admisión, donde se mezclan con la carga de aire de entrada. Lo anterior es una de las principales ventajas de este sistema, ya que de esta manera, al realizar la mezcla de aire de entrada/gases recirculados con el combustible se logra una reducción en las temperaturas de combustión y las presiones dentro de la cámara se reducen; por lo anterior se logra una reducción general de la producción de gases NO_x [31,32].

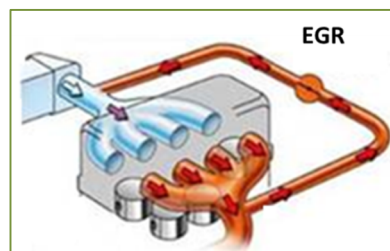


FIGURA 2.6. REPRESENTACIÓN DE LA RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE HACIA LA ENTRADA DEL MÚLTIPLE DE ADMISIÓN.

Finalmente, en motores a diésel se está desarrollando un filtro de partículas de regeneración pasiva. La regeneración pasiva permite la calcinación de las partículas atrapadas en este filtro, por lo cual esto ayudará a la auto limpieza del filtro sin tener que parar el vehículo a mantenimiento [33].

Actualmente, las nuevas tecnologías en los motores a gasolina se están basando en emplear un filtro de partículas, debido al gran incremento de motores a gasolina de inyección directa. Sin embargo, la emisión de partículas suspendidas en este tipo de combustión se está incrementando considerablemente, por eso la importancia de este filtro, el cual tendrá como función atrapar dichas partículas para después ser eliminadas mediante regeneración pasiva [34,35].

CAPÍTULO 3

MATERIALES EMPLEADOS EN CONVERTIDORES CATALÍTICOS

3.1 Introducción

La industria automotriz siempre se ha distinguido por su interés en el desarrollo y uso de nuevos materiales. Una diferencia de un centavo por libra en el costo de un material representa una diferencia significativa en ganancias para las compañías automotrices. La selección de materiales en esta industria se define principalmente por la facilidad del procesamiento y el desempeño dentro de la aplicación específica [36].

En el capítulo anterior se mencionaron los componentes de los convertidores catalíticos y la importancia que cada uno de ellos tienen en el sistema de escape, sin embargo para que puedan cumplir esa función deben estar elaborados de materiales altamente resistentes a la corrosión, a los choques térmicos y tener una buena resistencia mecánica. En general los convertidores emplean materiales metálicos, cerámicos y compuestos, los cuales serán descritos en este capítulo.

3.2 Materiales metálicos

Los metales se caracterizan por tener buenas propiedades térmicas y eléctricas, alta resistencia mecánica y alta rigidez además de ofrecer un buen desempeño bajo condiciones de carga, fatiga y presión, por estas propiedades son requeridos en diversas aplicaciones desde la industria de la

manufactura hasta aplicaciones estructurales. Los metales ofrecen la ventaja de poder producir aleaciones con las bondades de los elementos que las constituyen ofreciendo nuevos materiales diseñados para aplicaciones específicas [37,38].

Los materiales metálicos se clasifican en ferrosos y no ferrosos, los metales ferrosos se basan en aleaciones de Hierro-Carbono (Fe-C) como aceros, aceros inoxidable y hierro fundido, mientras los metales no ferrosos son aquellos materiales que no contienen Hierro, entre ellos están el Aluminio (Al), Cobre (Cu), Tungsteno (W), entre otros. Al igual que lo ferrosos estos materiales pueden crear aleaciones entre diferentes metales para obtener un material con las propiedades deseadas.

3.2.1 AISI 409 Y AISI 441

Los acero inoxidable se comenzaron a estudiar en 1913 por Henry Brearley quién encontró que los aceros con altos contenidos de Cromo (Cr) no eran atacados con soluciones ácidas, a partir de ahí se comenzó a estudiar el efecto del Cromo en los aceros. Hoy en día se sabe que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable se genera a partir de la oxidación del Cr de la superficie que genera una capa de cromita (FeCr_2O_4). Un tercer soluto como el Silicio (Si), Titanio (Ti), Niobio (Nb), Azufre (S) y Selenio (Se) puede ser introducido al sistema con el fin de impartir otras propiedades al material. Los aceros inoxidable pueden clasificarse según su estructura, de tal forma que podemos encontrar aceros martensíticos, ferríticos o austeníticos.

Los aceros inoxidable ferríticos son esencialmente aleaciones binarias de Fe-C, que se caracterizan por tener un contenido de Cr entre el 10.5-25%.

Algunos grados están aleados con Si, Al, Ti, Nb o Níquel (Ni) con la finalidad de obtener características específicas.

Estos aceros exhiben una buena ductilidad por lo cual se pueden manufacturar las diferentes formas del sistema de escape, formándolas con relativa facilidad. Además, poseen una excelente resistencia a altas temperaturas; mientras que la tenacidad de estos aceros se ve limitada a bajas temperaturas y en secciones gruesas. Estos aceros no son susceptibles a ser tratados térmicamente, ni son endurecidos por trabajado en frío [39].

Los aceros inoxidables ferríticos son relativamente bajos en costo comparados con otros aceros inoxidables, ya que contienen muy bajo porcentaje de Ni y se usan como materiales de construcción en los que se requiere una resistencia al calor y a la corrosión con alto grado de formalidad.

La Tabla 3.1 y La Tabla 3.2 presentan la composición química y propiedades de los aceros inoxidables AISI 409 y 441.

TABLA 3.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI 409 Y 441 [40].

		C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Ti
AISI 409	Min	-	-	-	-	10.5	-	6x%C
	Max	0.08	1	1	0.045	12.5	0.5	0.75
AISI 441	Min	-	-	-	-	17	-	0.1
	Max	0.03	1	1	0.04	19.5	0.1	0.6

TABLA 3.2. ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI 409 Y AISI 441 [40].

	AISI 409	AISI 441
Módulo de elasticidad (MPa)	208 000	220 000
Densidad (Kg/ m3)	7600	7600
Conductividad térmica (W/ m K)	25	25
Coeficiente de expansión térmica (1/ °C)	11	10
Calor específico (J/Kg K)	460	460
% de elongación	20	20

3.2.2 Hierro fundido

Es una aleación de hierro con bajo contenido de C y Si principalmente, el porcentaje en peso va de 1-4% de C y de 1-3% Si. El hierro fundido es en la actualidad el material más empleado en el colector de gases para equipar los automóviles esto debido a su bajo costo y a que es fácil de manejar para obtener complicadas formas de colectores de escape, ver Figura 3.1.

La principal desventaja en los colectores de escape es su peso ya que puede variar entre 3 y 9 kg, dependiendo de cada colector y con la importancia de la reducción de peso en la actualidad, esto se convierte en una gran limitación para seguir utilizándolo. Otra limitación importante es su temperatura de funcionamiento máxima alrededor de 880-950°C.

Este tipo de hierro fundido (SiMo) se sugiere para aplicaciones de alta temperatura (>760°C) en las que la resistencia contra el choque térmico y corrosión son necesarias, mientras uno de los problemas de este material es su relativa fragilidad [19].

La composición del hierro fundido (SiMo) es Fe-3.45C-4Si-0.6Mo-0.3Mn así como sus propiedades son mostradas en la Tabla 3.3.

TABLA 3.3. PROPIEDADES DEL HIERRO FUNDIDO EMPLEADO EN COLECTORES DE ESCAPE [40].

Propiedades		Variación con la temperatura (°C)				
		300	400	500	600	700
Hierro Fundido (SiMo)	Resistencia a la tensión (MPa)	490	410	295	145	80
	Dureza (HB)	200-240				
	Elongación (%)	8				



FIGURA 3.1. COLECTOR DE ESCAPE DE HIERRO FUNDIDO PARA MOTOR DE CUATRO CILINDROS [40].

3.2.3 AISI 1008

Este material es una aleación de bajo contenido de carbono, el cual posee una resistencia mecánica relativamente baja, la cual puede ser incrementada por medio de tratamientos térmicos, como el templado o el revenido para mejorar sus propiedades.

La Tabla 3.4 y Tabla 3.5 muestran su composición química y sus propiedades típicas, respectivamente.

TABLA 3.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AL CARBÓN AISI 1008 [36].

		C	Mn	P	S
AISI 1008	Min	0.08	0.3	-	-
	Max	0.13	0.6	0.045	0.05

TABLA 3.5. PROPIEDADES DEL ACERO AL CARBÓN AISI 1008 [36,40].

AISI 1008	
Módulo de elasticidad (MPa)	210 000
Densidad (Kg/ m3)	7700
Conductividad térmica (W/m K)	65.2
Coeficiente de expansión térmica(1/°C)	15
Calor específico (J/Kg K)	450
% Elongación	20

3.3 Materiales cerámicos

Los cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, son generalmente cristalinos y están formados entre elementos metálicos y no metálicos. Los enlaces en los cerámicos son parcial o totalmente iónicos y pueden tener una combinación de enlaces iónicos y covalentes. Debido al tipo de enlaces y a la estructura cristalina que presentan tienen en general altas temperaturas de fusión, alta dureza y resistencia, baja conductividad térmica, eléctrica y son en general materiales frágiles [41].

Los cerámicos avanzados son materiales ingenieriles con altos grados de pureza por lo que presentan mejores propiedades [7], son generalmente materiales conformados mediante aplicación de presión y/o calor. Entre los óxidos cerámicos más utilizados están el óxido de aluminio (Al_2O_3), el óxido de calcio (CaO), el nitruro de silicio (Si_3N_4), entre otros.

En los años 70 la industria automotriz comenzó a trabajar en la mejora del desempeño de los motores de combustión con la finalidad de reducir las emisiones, en general la investigación se basa en el hecho de que se pueden alcanzar altos niveles de eficiencia y mayor control de las emisiones tanto en motores a gasolina como a diésel con el incremento de las temperaturas de operación del sistema. Esta necesidad de operar a altas temperaturas impulsó el uso de componentes cerámicos, además que ofrecen propiedades como bajo peso, dureza y resistencia a la corrosión. [37,41].

3.3.1 Carburo de Silicio

El carburo de silicio (SiC) es el material más empleado para aplicaciones de cerámicas estructurales. Sus características como baja expansión térmica, la alta relación fuerza-peso, baja conductividad térmica, alta dureza, buena resistencia a la abrasión y a la corrosión, y la estabilidad de la resistencia elástica a temperaturas cercanas a los 1650°C , han conducido a una amplia gama de usos de este material.

El SiC se presenta en una variedad de formas cristalinas polimórficas, generalmente señalada como $\beta\text{-SiC}$ para la forma cúbica y $\alpha\text{-SiC}$ para las variedades hexagonales y romboédricas. El SiC presenta una estructura donde el 88% de los enlaces son de naturaleza covalente lo que ofrece la rigidez y la dureza del material. La forma α es la más estable a temperaturas superiores a los 2000°C , mientras que el $\beta\text{-SiC}$ cúbico es el producto más común cuando se encuentra en temperaturas más bajas.

El α -SiC es la conocida wurtzita, esta se puede describir formando un arreglo hexagonal compacto (HCP) llenando la mitad de los intersticios tetraédricos con cationes, el número de coordinación de ambos iones es 4. El β -SiC presenta una estructura tipo Zinc Blenda, se puede representar como una red cúbica centrada en las caras (CCC) de aniones con la mitad de los sitios tetraédricos ocupados por cationes. En esta estructura se forman tetraedros unidos por las aristas formándose túneles en la dirección $\langle 110 \rangle$ [41].

En el ramo automotriz el SiC es de gran utilidad en la eliminación de las partículas nocivas en los automóviles de motor a diésel. La Figura 3.2 muestra un filtro de partículas elaborado de SiC [42].

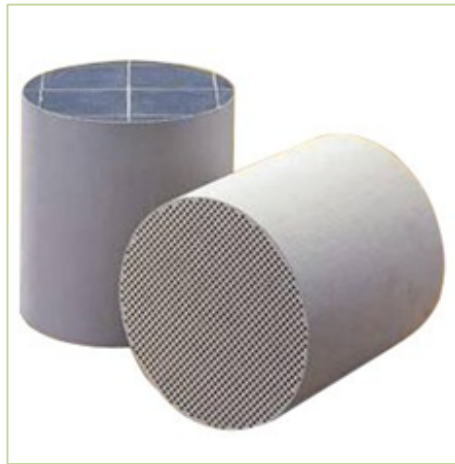


FIGURA 3.2. FILTRO DE PARTÍCULAS DIESEL SiC.

3.4 Materiales compuestos

Un material compuesto, es un material resultado de la combinación de dos o más materiales con el fin de obtener la combinación de sus propiedades, en su forma macroscópica los constituyentes del material se comportan como un solo sistema pero mantienen una estructura independiente [43]. Los componentes del material compuesto pueden ser continuos o discontinuos.

Los materiales continuos conforman la matriz y los materiales discontinuos son usualmente los responsables de asignarle las propiedades al compuesto y se les conoce como refuerzo [44].

Los refuerzos pueden ser fibras, partículas o whiskers, mientras que la matriz puede ser metálica, cerámica o polimérica. Los refuerzos pueden ser de cualquier tamaño y forma, para así obtener una gama de propiedades en el producto final.

La tecnología actual necesita disponer de materiales con una combinación de propiedades superiores a la que proporcionan los materiales convencionales, como se ha puesto de manifiesto en los requerimientos a los materiales en la industria aeroespacial, automotriz o en la industria deportiva. Esta necesidad ha sido cubierta en buena parte con el desarrollo de los materiales compuestos que permiten diseñar nuevos materiales con un conjunto de propiedades específicas que se ajustan a los requerimientos de la industria. Por ejemplo, en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, estas propiedades rara vez se dan juntas. A pesar de haber obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho el costo, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales [44].

Las propiedades de los materiales compuestos son dependientes de las propiedades de los materiales que lo constituyen, así como de su distribución e interacción entre ellos. Un material compuesto es aquel que cumple con las siguientes condiciones:

- Consta de 2 o más materiales físicamente distintos y separados mecánicamente.
- Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro puede hacerse de manera controlada para alcanzar las propiedades óptimas.

- Las propiedades son superiores y posiblemente únicas en algún aspecto específico a las propiedades de los componentes por separado.

Su ventaja es que debido a una combinación adecuada de estos componentes se obtienen materiales con mejores propiedades que los originales; tal es el caso de la cordierita y el aislante térmico Interam 100 de los cuales hablaremos a continuación.

3.4.1 Interam 100

Interam 100 es un material aislante compuesto por vermiculita como matriz y fibras cerámicas como refuerzo con la finalidad de obtener mejores propiedades para desempeñar sus funciones y cumplir con los requerimientos de los aislantes térmicos utilizados en los convertidores catalíticos.

La llamada vermiculita es un material aislante de origen mineral, es un producto derivado de la descomposición de la mica, que contiene agua cristalizada en su interior. Se trata de un mineral laminar hidratado con silicatos de aluminio y magnesio. Cuando se calienta se expanden las láminas que lo conforman y se hinchan atrapando en su interior burbujas de aire. Es un material de baja densidad aproximadamente unos 2.6 kg/m^3 y su principal aplicación es como aislante térmico y/o acústico. En el sistema de escape la vermiculita llega a expandirse hasta 4 veces bajo la primera exposición a los gases de escape, este incremento en volumen permite generar la unión completa entre el monolito de cordierita y la carcasa [23].

En la Tabla 3.6 se puede observar las diferentes composiciones del material así como su espesor y algunas propiedades, la Figura 3.3 muestra el material Interam 100 preparado para ser utilizado en un convertidor catalítico.

TABLA 3.6. SE MUESTRA LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y ALGUNAS PROPIEDADES DEL AISLANTE INTERAM 100 [45].

Propiedades Físicas	2600g/m ²	3100g/m ²	3662g/m ²	4070g/m ²	4300g/m ²	6200g/m ²
Espesor nominal	1.15	4.19	5.40	6.02	6.32	9.8
Rango del espesor	3.65-4.65	4.30-5.50	4.75-6.05	5.30-6.74	5.56-7.08	8.60-11.0
Rango de peso	2340-2860	2852-3348	3369-3955	3744-4396	3956-4644	5750-6750
Peso de la Vermiculita	45-60	45-60	45-60	45-60	45-60	45-60
Peso de las fibra	30-45	30-45	30-45	30-45	30-45	30-45
Pérdida de peso	6-13	6-13	6-13	6-13	6-13	6-13
Temperatura de expansión	<410	<410	<410	<410	<410	<410
Resistencia a la tensión	>100	>100	>100	>100	>100	>100



FIGURA 3.3. INTERAM 100 PREPARADO PARA SER ENSAMBLADO EN EL CONVERTIDOR CATALÍTICO [45].

3.4.2 Cordierita

La cordierita es un silicato de aluminio-magnesio de composición estequiométrica 13.8% de MgO, 34.8% de Al₂O₃ y 51.4% de SiO₂. Debido a su bajo coeficiente de expansión térmica es empleado donde se requiere un material refractario estable y de buena resistencia al choque térmico.

Una característica distintiva de los materiales cordieríticos es su capacidad de soportar variaciones rápidas en la temperatura por encima de los 1200°C manteniendo una buena resistencia mecánica [10,46]. La cordierita se fabrica

bajo diseño previo a diferentes formas y estructuras del material; sin embargo para muchas aplicaciones la cordierita se utiliza como estructura tipo enjambre, estructura mayor o cilindros dependiendo de la aplicación. En la industria automotriz, la cordierita del tipo enjambre es utilizada en los convertidores catalíticos, como soporte en la catálisis o en el filtro de gases de alta temperatura, esto por su capacidad de reducir los gases de escape nocivos, así como otras partículas del flujo de gas.

En la Tabla 3.7 se representan las propiedades de los principales panales de cordierita.

TABLA 3.7. PROPIEDADES DE PANALES DE CORDIERITA [10].

Material	Unidades	200cpsi	400cpsi	Muestra sólida
Pitch	mm	1-73	1-28	
Ancho	mm	0-22	0-17	
Módulo de elasticidad(MOE)	(GPa)	14	16	64
Módulo de ruptura (MOR)	Kg/cm ²	79	81	511
MOR a 900°C	Kg/cm ²	75	86	
Límite de ruptura: a	Kg/cm ²	378	383	1533
Límite de ruptura: b	Kg/cm ²	49	63	
Límite de ruptura: c	Kg/cm ²	4.3	5.9	
Coeficiente de expansión térmica(CTE)	x10-6/C	1.43	1.35	1.5
Densidad	g/cc	1.95	1.79	2.10
Porosidad aparente	%	26	31	25

3.4.3 Saffil E200

El Saffil es un material que incursiono al mercado en 1970, y está basado en un refuerzo de fibras 97%Al₂O₃, 3%SiO₂. Las fibras de refuerzo pueden ser policristalinas y amorfas, pero siempre tienen un diámetro muy controlado. Este material ha mostrado tener excelente durabilidad en los ensayos de fatiga bajo compresión y también bajo condiciones de temperatura de operación. El Saffil ha mostrado ser un material que bajo condiciones de operación no se desfibra ni desgasta la matriz.

El Saffil es considerado bajo las regulaciones internacionales como material no tóxico. En general, tiene altos niveles de estabilidad ante condiciones de temperatura o presión extrema en conjunto con un alto grado de durabilidad. Por último, cabe mencionar que Saffil es un material que ofrece diferentes matrices para un mismo refuerzo, así se tienen una gama de aplicaciones en la industria automotriz para su uso [42].

CAPÍTULO 4

TEORÍA DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

4.1 Introducción

Esta investigación fue realizada empleando el método de elemento finito (MEF) para obtener la distribución de temperaturas y frecuencias naturales del convertidor catalítico. Este método es ampliamente utilizado en la ingeniería por su gran confiabilidad, pero en algunos casos las geometrías suelen ser muy complicadas o las condiciones frontera no son adecuadas para este tipo de análisis, en ocasiones estas dificultades pueden ser contrarrestadas al considerar un conjunto de suposiciones, pero este procedimiento podría resultar en la obtención de respuestas totalmente erróneas, si este no es hecho tomando en cuenta las variables críticas del proceso a simular.

Para crear una simulación empleando MEF, primeramente debe ser definido el sistema y posteriormente se desarrolla una metodología de simulación empleando herramientas de programación y de ingeniería asistida por computadora. En ocasiones se dispone de poderosos paquetes computacionales encargados de resolver las ecuaciones. De esta forma, la simulación utiliza un software para evaluar un modelo numérico y con la ayuda de interfaces gráficas y de visualización de resultados se llega a imitar una idealización de un sistema real, una vez resuelto el modelo es importante corroborar los resultados con los obtenidos a nivel experimental, para así validar el sistema propuesto.

Si la validación es satisfactoria se puede ir al siguiente paso que consiste en hacer predicciones. Si no es satisfactoria entonces se tendrán que hacer ajustes a los parámetros de entrada del modelo o inclusive a una modificación total del modelo, ya sea redefiniendo alguna ecuación o alguna de las condiciones frontera que pudiera estar mal especificada [47]. Cuando se analiza un sistema mediante un método numérico las relaciones que componen a éste son relativamente simples, es posible obtener una solución exacta del problema de interés; a este proceso se le llama método analítico. Sin embargo, la mayoría de los sistemas en la vida real son extremadamente complejos y no es posible resolverlos por métodos analíticos, por lo tanto, se recurre a los métodos numéricos. En los métodos analíticos el problema puede ser resuelto mediante un conjunto de ecuaciones que pueden ser reducidas a una sola solución a través de álgebra, cálculo, ecuaciones diferenciales o ecuaciones diferenciales parciales, mientras en los métodos numéricos se busca resolver un conjunto más complejo de ecuaciones [48]. Los software especializados pueden resolver estos sistemas en una forma muy rápida y eficiente.

Los sistemas con estas características son conocidos como sistemas continuos. Dado que la solución final de las ecuaciones está representada por una función o alguna serie infinita, se puede elegir cualquier punto sobre el dominio e introducirlo en la función para obtener un resultado. De forma alternativa un sistema puede ser definido como una colección de componentes o elementos sobre los cuales la respuesta del sistema puede ser descrita mediante la solución de un número finito de valores desconocidos. Tales sistemas se conocen como sistemas discretos. El procedimiento para convertir un sistema continuo a un sistema discreto se conoce como discretización. A lo largo de los años se han desarrollado diferentes métodos de discretización para los sistemas continuos. Todos involucran una aproximación la cual debe mejorar conforme se incrementa el número de variables discretas [49].

Esto representa una ventaja porque hoy en día se cuenta con computadoras que utilizan procesadores de alta velocidad y por lo tanto es posible resolver un problema discreto en un periodo corto de tiempo.

4.2 Historia del método de elemento finito

El método de elemento finito surge a partir de 2 ramas: la ingeniería y las matemáticas. Desde el punto de vista matemático se diseñaron técnicas que se aplicaban directamente sobre las ecuaciones diferenciales, tales como los métodos de diferencias finitas, métodos de residuos ponderados y los métodos variacionales [50]. Rayleigh en 1870 así como Ritz y Galerkin entre 1909 y 1915 utilizaron funciones de prueba (también llamadas funciones de interpolación) para aproximar las soluciones de las ecuaciones diferenciales. Sin embargo, ellos aplicaban el método sobre todo el dominio del problema analizado [51]. En 1943 Courant realizó un ensamble de elementos triangulares y aplicó el principio de energía potencial mínima para resolver problemas de torsión [47,52]. En 1959 Greenstadt presentó un método de discretización, el cual involucraba celdas en lugar de puntos y para cada celda la función desconocida era representada mediante una serie de funciones, cada una asociada con cada celda para después aplicar un método variacional apropiado a cada celda y finalmente acoplar las ecuaciones obtenidas para todas las celdas. Muchas de sus ideas junto con las de Galerkin sirvieron como base matemática para el método de elemento finito y prácticamente se han mantenido hasta hoy en día.

Desde el punto de vista de la ingeniería se atacaba al problema creando una analogía entre elementos discretos y porciones finitas de un dominio continuo. Las aplicaciones iniciales eran para resolver problemas estructurales.

En los años 40 McHenry, Hrenikoff, Newmark y Southwell demostraron que se podían obtener buenas soluciones a problemas de elasticidad reemplazando pequeñas porciones del sistema continuo a un arreglo de barras elásticas simples. En 1956 Turner y Clough publicaron una solución para problemas que presentaban condiciones de esfuerzo plano utilizando elementos triangulares cuyas propiedades se determinaron a partir de las ecuaciones de la teoría de elasticidad. Desde el punto de vista ingenieril nace el término “elemento finito” utilizado por primera vez por Clough en 1960 [51,47]. Igualmente en este año surge una publicación de Argyris, la cual establece en forma detallada una formulación matricial para la teoría estructural, demostrando que ésta podía ser generalizada para cualquier tipo de aplicación que involucrara elementos estructurales diferentes a vigas y/o barras [51].

Desde el punto de vista computacional, Argyris publicó en 1954 una serie de artículos que cubrían análisis lineales estructurales y técnicas eficientes de solución para ser resueltos mediante una computadora. Trabajos similares fueron realizados por Clough durante ese periodo [53]. A partir de 1960 comenzaron a crearse paquetes computacionales de elemento finito, entre los primeros surgió NASTRAN, el cual fue un punto de partida para la generación de paquetes computacionales como ANSYS, ALGOR, COSMOS, entre otros [51]. En la Figura 4.1 se muestra una pequeña cronología de la evolución del método de elemento finito.

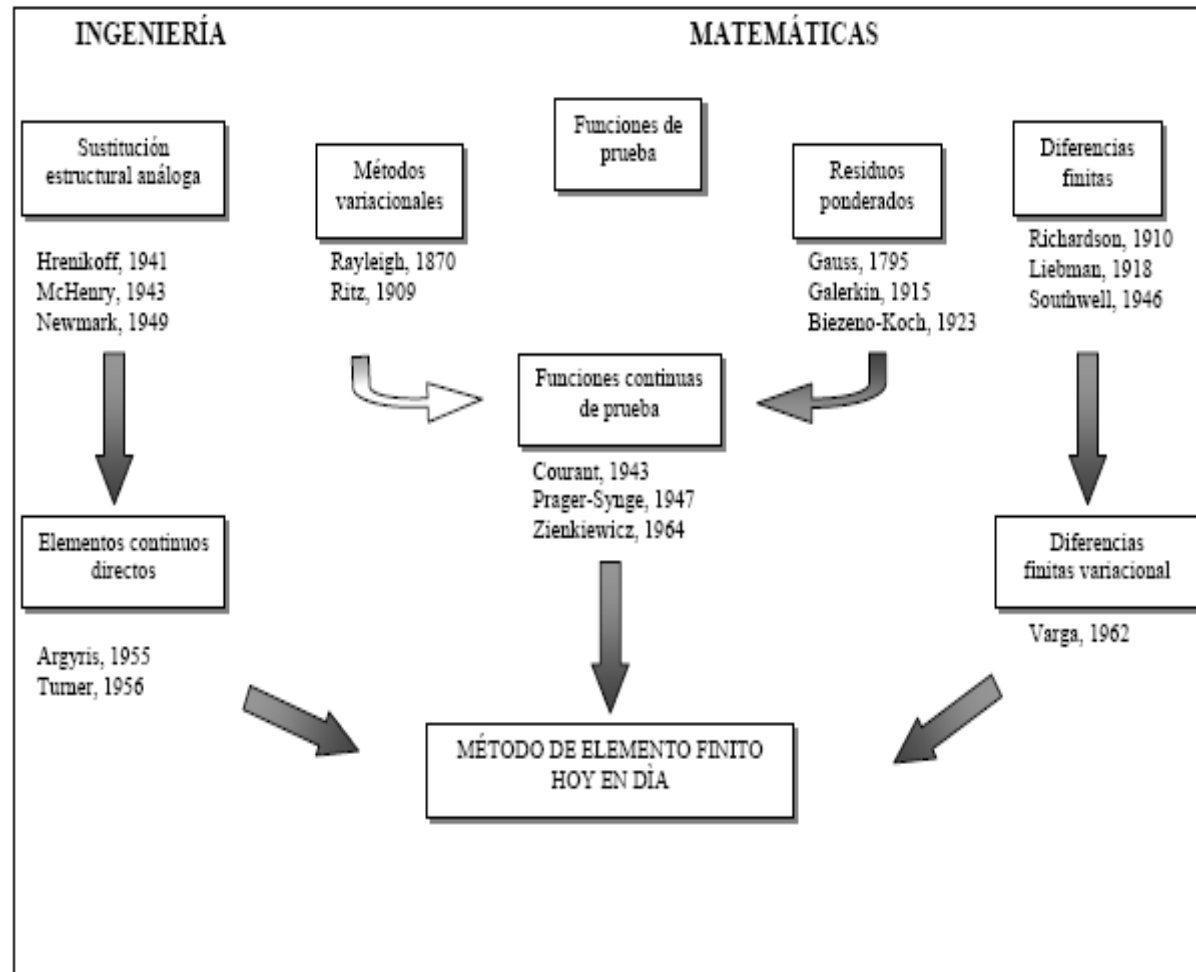


FIGURA 4.1. HISTORIA DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO [50].

4.3 Desarrollo del método de elemento finito

Antes de definir el método de elemento finito (MEF) será conveniente ver algunos aspectos importantes que servirán como base para su mejor entendimiento. El MEF puede ser definido como una técnica numérica utilizada para obtener una solución aproximada de un problema de ingeniería. El procedimiento de discretización consiste en dividir el sistema continuo en un número (m) de elementos que se encuentran conectados por nodos. A diferencia del método de diferencias finitas (MDF) y el método de volumen finito (MVF), el MEF permite utilizar elementos de diversas geometrías tales como triángulos, rectángulos o cuadriláteros en 2 dimensiones o elementos hexaédricos o tetraédricos en 3 dimensiones sobre los que se aplica la formulación. El MEF no ofrece restricción al trabajar con una geometría compleja dado que los elementos pueden ser elegidos de cualquier tamaño, forma y cualquier orientación para ajustarse a la geometría dada, situación que hace el MDF no sea eficiente en este tipo de casos. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de mallado empleando el MDF (caso a) y el MEF (caso b).

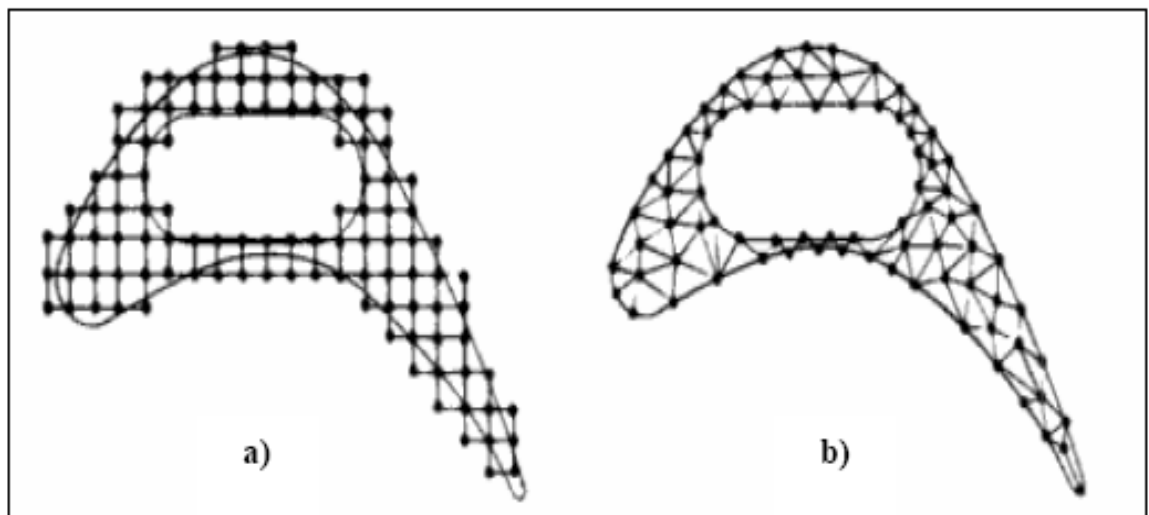


FIGURA 4.2. EJEMPLO DE MALLADO EMPLEANDO EL MDF Y EL MEF [50]

El MEF se enfoca más a problemas con condiciones frontera Neumann, la cual se presenta cuando a una ecuación diferencial ordinaria se le especifican los valores de la derivada de una solución tomada sobre la frontera o contorno del dominio; mientras que el MDF y el MVF son más aplicados a problemas con condiciones frontera Dirichlet, la cual se aplica cuando en una ecuación diferencial ordinaria, se le especifican los valores de la solución sobre la frontera del dominio [54]. Otra diferencia importante es la forma en que se manipulan las ecuaciones gobernantes; en el MEF las ecuaciones son definidas en forma independiente para cada elemento y se tienen como herramienta los siguientes métodos:

- Método variacional: Los métodos basados en energía, como por ejemplo, el principio de Hamilton o el principio de mínima energía potencial son considerados como una forma especial del principio variacional.
- Método de residuos ponderados.
- Método basado en la serie de Taylor (MDF).
- Método basado en las leyes de conservación sobre volúmenes de control (MVF).
- Representación integral (métodos libres de malla).

Posteriormente se hace una interconexión de todas las relaciones obtenidas para llegar a obtener un conjunto matricial (global) de ecuaciones con un cierto número de incógnitas que deberá ser resuelto para obtener la solución final. A continuación, se detalla la formulación de MEF de una geometría triangular con cuatro nodos donde se aplica una fuerza F , así como la representación de la placa en forma de un conjunto de resortes, ver Figura 4.3.

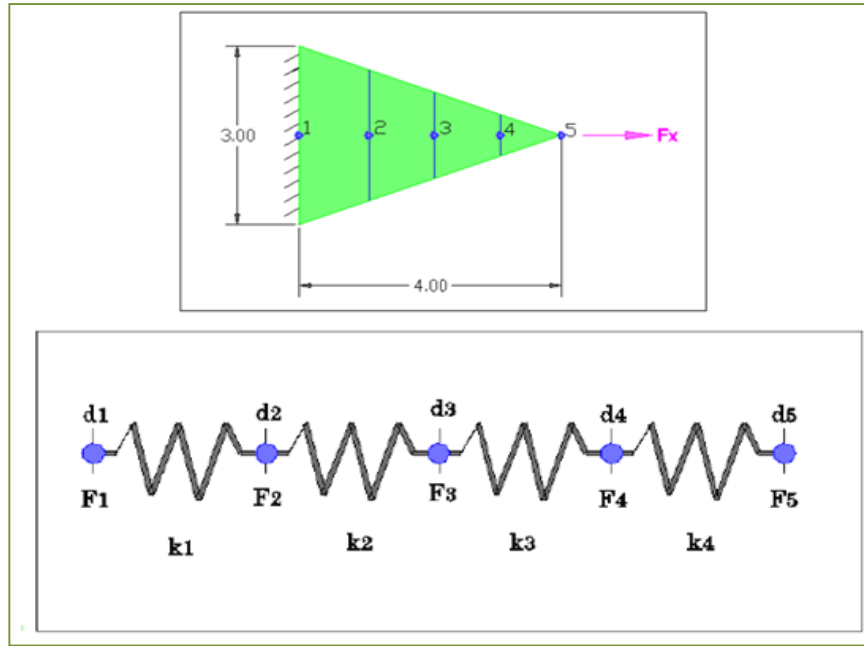


FIGURA 4.3. PLACA CON CUATRO NODOS REPRESENTADA EN UN CONJUNTO DE RESORTE [55]

Las funciones de rigidez para cada uno de los elementos de la Figura 4.3 pueden observarse de la forma expresada en la Ecuación (4.1):

$$k = \frac{F}{x} \quad (4.1)$$

donde, F es la fuerza, k es la constante de proporcionalidad o rigidez, mientras x es el desplazamiento [27]. Robert Hooke, establece que un cuerpo elástico sufre una deformación al aplicar una fuerza de acuerdo a la relación anterior. La constante de proporcionalidad o rigidez k puede ser calculada mediante la Ecuación (4.2) [27]:

$$k = \frac{EA}{L} \quad (4.2)$$

donde, E es el módulo de Young, A es el área transversal del elemento y L es la longitud del elemento. El valor mayor para el cual se puede utilizar la ley de Hooke es conocido como límite de proporcionalidad del material.

A partir de las ecuaciones anteriores y sabiendo que los grados de libertad son los desplazamientos axiales de cada nodo, se obtiene la Ecuación (4.3), para cada elemento que representa la placa de la Figura 4.3:

$$\begin{aligned}
 k_1(d_1 - d_2) &= F_1 - F_2 \\
 k_2(d_2 - d_3) &= F_2 - F_3 \\
 k_3(d_3 - d_4) &= F_3 - F_4 \\
 k_4(d_4 - d_5) &= F_4 - F_5
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Escribiendo las ecuaciones anteriores en forma de matriz para cada uno de los elementos resultan en:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_2 \\ d_3 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_3 \\ d_4 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} k_4 & -k_4 \\ -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_4 \\ d_5 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

De la Ecuación (4.4) se obtiene la matriz de rigidez representada en la Ecuación (4.5), la cual tiene la forma $Ku=F$ y podrá ser calculada por cualquier sistema computacional MEF [56].

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{Bmatrix} \tag{4.5}$$

La aproximación de la Ecuación (4.6) podrá utilizarse para resolver una gran cantidad de análisis. La Tabla 4.1 resume la aproximación y de manera análoga muestra cómo se aplica éste método para otros análisis.

$$[K]\{u\} = \{F\} \tag{4.6}$$

TABLA 4.1. APROXIMACIÓN UTILIZADA Y ANALOGÍA CON OTROS ANÁLISIS.

	Propiedad [K]	Comportamiento {u}	Acción {F}
Elástico	Rigidez	Desplazamiento	Fuerza
Térmico	Conductividad	Temperatura	Flujo de Calor
Electro estático	Permeabilidad eléctrica	Potencial eléctrico	Carga

4.4 Formulación matemática para el método de elemento finito

Un modelo matemático reúne un conjunto de ecuaciones (comúnmente ecuaciones diferenciales) que representan las leyes de la naturaleza que actúan sobre el sistema. Posteriormente, se busca resolver mediante diversos métodos considerando las condiciones iniciales y de frontera disponibles para el modelo. En el presente estudio se explican brevemente los métodos para resolver los modelos, tales como el método de aproximación directa, método de Ritz y método de residuos ponderados.

4.4.1 Método de aproximación directa

Con este método es posible resolver problemas aplicando un razonamiento físico directo; es decir, las ecuaciones que rigen el modelo son relativamente sencillas y no exigen un análisis matemático riguroso. Los elementos discretos pueden ser sencillamente identificados y las propiedades de cada elemento son obtenidas para hacer un ensamble del sistema entero [57]. En la Figura 4.4 se muestran varios ejemplos en los que se puede aplicar este método. En el caso a) cada resorte con constante elástica k_j puede representarse como un elemento y la relación que existe entre fuerza y desplazamiento es la ley de Hooke (Ecuación 4.1).

El caso b) es un problema térmico y la constante k ahora es llamada conductividad térmica y en este caso el sistema se representa por un solo elemento y los flujos de calor se obtienen aplicando la ley de Fourier. Nótese que para cada uno de estos casos se llega a un sistema matricial de la forma $Ku=F$, además se puede observar que dentro de la matriz K están contenidas las propiedades del elemento; a esta matriz se le conoce como matriz de rigidez.

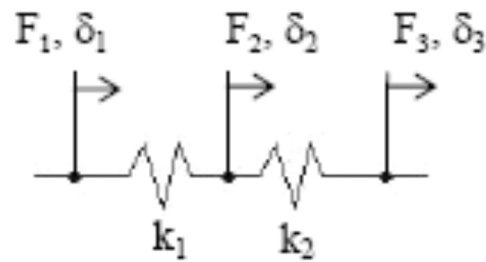
4.4.2 Método de Ritz

El método de Ritz es un método variacional en el cual se busca obtener una solución aproximada para el problema en cuestión utilizando una combinación lineal de funciones de prueba w_i con parámetros indeterminados c_i . Para poder aplicar este método, así como todos los métodos variacionales, se requiere contar con un funcional, el cual es extremizado diferenciándolo con respecto a cada variable desconocida c_i . De este procedimiento se obtiene un sistema de (n) ecuaciones simultáneas de las cuales se obtendrá cada valor c_i . En el método de Ritz las funciones de prueba definen completamente al dominio que se está analizando y deben de satisfacer las condiciones frontera presentes en éste [47,57]. El funcional I puede ser representado por la Ecuación 4.7.

$$I(\phi) = \int \int F(\phi, \phi_x, \phi_{xx}, \phi_{xy}, \dots) dx dy \quad (4.7)$$

En la Ecuación 4.7, F puede depender de una función Φ así como de sus derivadas parciales ($\Phi_x, \Phi_{xx}, \Phi_{xy}, \dots$). Por ejemplo, en una dimensión la solución original Φ puede ser aproximada a una función ϕ en un intervalo $[x_1, x_2]$ utilizando una combinación lineal de las funciones de prueba:

$$\phi(x) \approx \tilde{\phi}(x) = \psi_0 + \psi_i c_i \quad (4.8)$$



$$F_1 + F_2 + F_3 = 0 \quad (\text{Equilibrio})$$

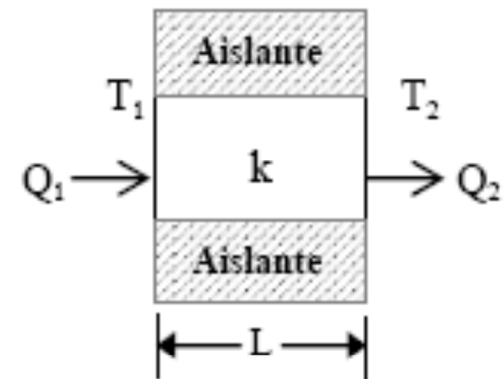
$$F_1 = k_1(\delta_1 - \delta_2) \quad F_3 = k_2(\delta_3 - \delta_2)$$

$$F_2 = -k_1\delta_1 + (k_1 + k_2)\delta_2 - k_2\delta_3$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix}$$

$$\boxed{F = Ku}$$

a) Sistema de resortes



$$Q_1 + Q_2 = 0 \quad (\text{Equilibrio})$$

$$Q_1 = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad Q_2 = -kA \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = -\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

$$\boxed{Q = KT}$$

b) Transferencia de calor

FIGURA 4.4. APLICACIONES PARA EL MÉTODO DE APROXIMACIÓN DIRECTA.

En la Ecuación 4.8, Ψ_i representa a las funciones de prueba. Existen (n) coeficientes c_i a ser determinados. Una vez que estas funciones son elegidas de tal forma que cumplan las condiciones frontera, son introducidas en el funcional el cual es posteriormente extremizado con respecto a cada coeficiente c_i (Ecuación 4.9):

$$\frac{\delta}{\delta c_i} [I(\tilde{\phi})] = 0 \quad (4.9)$$

Como se mencionó previamente el método de elemento finito consiste en subdividir el dominio por elementos unidos por nodos. Aplicando el concepto del método de Ritz a esta técnica numérica, el funcional ahora será minimizado para cada elemento en forma independiente y posteriormente se sumarán todas las contribuciones de cada uno de los funcionales extremizados para cada elemento, de esta forma se obtiene el sistema global de ecuaciones. En este caso las funciones de prueba ahora serán conocidas con el nombre de funciones de interpolación o funciones de forma (N_i). Ahora para cada elemento existirán (n) variables desconocidas donde (n) será el número de nodos por elemento (el número de elementos es (m)); Ecuaciones (4.10) y (4.11):

$$u^{(e)} = N_i u_i \quad (4.10)$$

$$\frac{\delta}{\delta u_j} [I^{(e)}] = 0 \quad j = 1, 2 \dots n \quad (4.11)$$

En el caso de que exista un funcional cuadrático, es decir, que la función u y sus derivadas tienen como grado máximo 2, la Ecuación (4.11) tendrá la siguiente forma expresada en la Ecuación (4.12) [50]:

$$\frac{\delta}{\delta u_j} [I^{(e)}] = Ku - f = 0 \quad (4.12)$$

4.4.3 Método de residuos ponderados

Este método representa otra forma de obtener una formulación para el método de elemento finito. Esta técnica es apropiada cuando no se dispone del funcional en el método variacional. Esto es debido a que aún y cuando todos los problemas físicos pueden ser representados mediante un funcional la obtención puede ser relativamente complicada. El procedimiento puede explicarse de la siguiente manera [47,57]. Se tiene una ecuación diferencial de forma (Ecuación 4.13):

$$f(\phi(x, y)) = D_x \frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} - g\phi + Q = 0 \quad (4.13)$$

donde, D_x y D_y , g y Q son constantes físicas. Inicialmente se aplica el concepto del método de Ritz utilizando las funciones de aproximación de la Ecuación (4.10). Sustituyendo la Ecuación (4.10) en la Ecuación (4.13) origina un valor llamado residuo (R) o error el cual será diferente de cero debido a que la función de prueba está siendo utilizada para aproximar a la solución original como se muestra en la Ecuación (4.14):

$$R = f(\tilde{\phi}(x, y)) \neq 0 \quad (4.14)$$

R también estará en función de los valores desconocidos u_i . Ahora los valores u_i serán determinados de tal forma que R desaparezca en un sentido promedio sobre el dominio completo, tal como se expresa en la Ecuación (4.15):

$$\int_{\Omega} w_i R d\Omega = 0 \quad (4.15)$$

Los w_i son llamados funciones de ponderación. Según la elección de estas funciones es el nombre que se le da al método [50]:

a) Método de colocación.

Este procedimiento equivale simplemente hacer nulo el residuo en n puntos dentro del dominio, resultando innecesaria la integración. (w_j es admisible a pesar de que no satisface el criterio de integración). Así tenemos que $w_j = \delta_{ij}$, donde δ_{ij} es tal que para $x = x_j; y = y_j$, $w_j = 1$, pero $\int_{\Omega} w_j d\Omega = 1$ (matriz unidad).

b) Método de subdominios.

Este método se basa esencialmente en $w_j = 1$ en Ω_j y cero en cualquier punto, esto hace que la integral del error sobre el subdominio especificado del dominio sea nula.

c) Método de mínimos cuadrados ($w_i = \partial R / \partial u_i$).

La aproximación estándar trata de minimizar el cuadrado de la función de error en cada punto del dominio Ω

d) Método de Galerkin.

En el método de Galerkin el residuo se hace ortogonal a un subespacio de la misma dirección (N). Si los espacios de aproximación y ponderación son diferentes se utiliza el método de Petrov-Galerkin $w_j \neq N_j$, y si coinciden se conoce como Bubnov-Galerkin. $w_j = N_j$. Este método permite frecuentemente (pero no siempre) obtener matrices simétricas y por esta y otras razones se adoptarán casi exclusivamente para nuestras operaciones con elementos finitos.

Este último método es el más utilizado para el análisis de residuos ponderados, por la ventaja computacional que implica tener una matriz simétrica.

4.5 MEF para el análisis modal y térmico de un convertidor catalítico

4.5.1 Extracción de valores característicos

Un área clásica de estudio en la mecánica estructural es la determinación de las frecuencias naturales o modos de un sistema. Las frecuencias naturales a las cuales el sistema entra en resonancia y maximiza la amplitud de sus oscilaciones, son conocidas como frecuencias naturales[58].

Sea un sistema con masa M , con una matriz de amortiguamiento C y una matriz de rigidez K , entonces, la dinámica de dicho sistema se caracteriza por la siguiente ecuación dinámica [59],

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (4.16)$$

donde, $u(t)$ corresponde al vector de desplazamientos del sistema y $f(t)$ corresponde al vector de fuerzas. Para el caso del análisis de las frecuencias naturales, el vector de fuerzas $f(t)$ se vuelve cero y, para el caso de interés de este trabajo, la matriz de amortiguamiento se nulifica, por lo cual se puede rescribir la Ecuación 4.16 de la siguiente forma:

$$(\mu^2 M + K)\{\phi\} = 0 \quad (4.17)$$

donde, μ es el valor característico y ϕ es el vector característico, éstos para un modo de vibración en particular [60].

La particularidad de la Ecuación 4.17 es que, una vez conociendo el valor característico, la frecuencia natural (ω) se obtiene por la simple relación presentada en la Ecuación 4.18:

$$\mu = i\omega \quad (4.18)$$

El problema entonces de interés pasa a ser el extraer los valores característicos para distintos modos vibratorios del sistema.

Existen muchos métodos para extraer los valores característicos, los cuales se discuten más detalladamente en otras fuentes. No obstante, en el presente proyecto se introduce un método de solución, conocido como Algoritmo de Lanczos. En general, el algoritmo de Lanczos es una derivación del método de las potencias para la extracción de los valores característicos y vectores característicos de matrices muy grandes [61].

Para mantener la estabilidad numérica, se propone un método en el cual se efectúan las iteraciones numéricas en bloques [62]. El principio básico del algoritmo de Lanczos para lograr una rápida convergencia es haciendo uso de las transformaciones espectrales, con el fin de extraer valores característicos extremos e internos de la matriz. Esto se hace a través de la Ecuación 4.19 a continuación:

$$M(K - \sigma M)^{-1}M\{\phi\} = \theta M\{\phi\} \quad (4.19)$$

donde, σ es el valor de corrimiento y θ es el nuevo valor característico, el cual está relacionado la frecuencia natural ω a través de la siguiente ecuación:

$$\omega^2 = \frac{1}{\theta} + \sigma \quad (4.20)$$

A través de los bloques de vectores de Lanczos, se crean en cada iteración subespacios de Krylov de tamaño b en donde se efectúan aproximaciones de los vectores característicos [63]. Estos bloques van creciendo conforme avanza de iteraciones, para mejorar el proceso de búsqueda de valores característicos. Este proceso, junto con la transformación espectral, permite encontrar rápidamente un número determinado de valores característicos a un costo computacional accesible. El algoritmo de Lanczos, para cada paso i , se detalla a continuación [60]:

1. Resolver el sistema de ecuaciones utilizando la ecuación transformada espectralmente (Ecuación 4.19) tal que $(K - \sigma_p M)\hat{V}_{i+1} = MV_i$, donde $V \in \mathbb{R}^{N \times b}$ (N es el número de variables del sistema de elementos finitos y b es el tamaño del bloque de Lanczos), es el bloque vectorial de Lanczos. Para el caso de V_1 , se inicializa usando vectores ortonormales aleatorios tal que $I = V_1^T M V_1$.
2. Asignar valores al bloque de vectores auxiliares U_i : $U_{i+1} = \hat{V}_{i+1} - V_{i-1}\beta_i$, en donde $\beta_i \in \mathbb{R}^{b \times b}$ es una matriz triangular superior y $\beta_1 = [0]$.
3. Calcular la matriz simétrica $\alpha_i \in \mathbb{R}^{b \times b}$ tal que $\alpha_i = U_{i+1}^T M V_i$.
4. Formular el residual de Lanczos: $R_{i+1} = U_{i+1} - V_i \alpha_i$
5. Normalizar el residual y calcular el bloque de vectores de Lanczos V_{i+1} de forma que: $V_{i+1}\beta_{i+1} = R_{i+1}$, y: $I = V_{i+1}^T M V_{i+1}$
6. Estimar el grado de ortogonalidad entre V_{i+1} y V_j (donde $j = 1, 2, \dots, i - 1$) y efectuar reortogonalización si es necesario [62]
7. Efectuar reortogonalización local. Recalcular V_{i+1} tal que: $[0] = V_{i+1}^T M V_i$
8. Resolver el siguiente problema reducido de los valores característicos para la matriz banda T tal que $TS = S\Theta$, donde S y Θ son las matrices que contienen los vectores característicos y valores característicos,

$$\text{para el problema reducido y } T = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_2^T & & & \\ \beta_2 & \alpha_2 & \beta_3^T & & \\ & \beta_3 & \alpha_3 & \beta_4^T & \\ & & \beta_4 & \alpha_4 & \dots \\ & & & \dots & \dots & \beta_i^T \\ & & & & \beta_i & \alpha_i \end{bmatrix}, \text{ el cual}$$

se resuelve utilizando las técnicas de Householder y algoritmos Q-R, detallados en [62].

9. Verificar si alguna condición de finalización de corrida de Lanczos se satisface:
 - a) Todos los valores característicos para la corrida son extraídos

- b) La matriz triangular β_{i+1} es singular o mal condicionada (es decir, donde pequeños cambios en sus coeficientes promueven grandes cambios en sus soluciones)
- c) La cantidad de iteraciones de Lanczos excedió un límite preestablecido
- d) La corrida actual se vuelve computacionalmente costosa. Normalmente el costo por el valor característico suele ir decreciendo conforme avanza la iteración.

De esta forma, se habrán entonces extraído todos los valores característicos solicitados y, a través de la Ecuación 4.18, se conocerá entonces la frecuencia natural del sistema para cada modo, resolviendo así el problema.

4.5.2 Transferencia de calor

Durante el proceso de transferencia de calor, existen tres procesos básicos para provocar cambios en la entropía del sistema: 1) conducción, 2) convección/difusión y 3) radiación [64].

Asumiendo que no existe acople alguno mecánico (es decir, que algún cambio de temperatura no provoca esfuerzos ni deformaciones en el sistema), se parte de la ecuación básica del balance de energías propuesto en [65], presente en la Ecuación 4.21:

$$\int_V \rho \dot{U} dV = \int_S q dS + \int_V r dV, \quad (4.21)$$

donde, V es un volumen de material sólido con una superficie S , ρ es la densidad del material, \dot{U} es el cambio de energía interna en el tiempo, q es el flujo de calor por unidad de área y r es el calor transmitido al cuerpo por unidad de volumen.

Asumiendo además que se trabaja en condiciones monofásicas (por lo cual no se toma en cuenta el calor latente de los cuerpos), la conducción de calor está por la Ley de Fourier presentada en la Ecuación 4.22 [66].

$$f = -k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad (4.22)$$

donde, $k(\theta)$ es la matriz de conductividad dependiente de la temperatura, f es el flujo de calor y x es la posición.

Tomando en cuenta entonces los efectos de la conductividad contenida en la Ley de Fourier (Ecuación 4.22), es posible reescribir la Ecuación 4.21 de modo que se obtiene la Ecuación 4.23:

$$\int_V \rho \dot{U} \delta \theta dV + \int_V \frac{\partial \delta \theta}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} dV = \int_V \delta \theta r dV + \int_{S_q} \delta \theta q dS, \quad (4.23)$$

donde, $\delta \theta$ es una variación arbitraria de temperatura propuesta por el enfoque de Galerkin [60], tal que pueda satisfacer las condiciones de frontera (las cuales se detallarán posteriormente). Dado que el cuerpo es aproximado usando elementos finitos, la temperatura es interpolada utilizando la Ecuación 4.24:

$$\theta = N^N(x) \theta^N, \quad N = 1, 2, \dots, \quad (4.24)$$

donde, θ^N es la temperatura en el nodo N .

Utilizando el mismo enfoque de Galerkin, la interpolación de $\delta \theta$ viene siendo una expresión similar a la Ecuación 4.24, tal que $\delta \theta = N^N \delta \theta^N$. Sustituyendo esta última expresión en la Ecuación 4.23, y considerando que es un término arbitrario $\delta \theta$ (por lo cual se puede nulificar para propósitos de visualización), la ecuación general de transferencia de calor en tiempo continuo para un volumen aproximado en elementos discretos es descrita por la Ecuación 4.25 [60]:

$$\int_V N^N \rho \dot{U} dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} dV = \int_V N^N r dV + \int_{S_q} N^N q dS \quad (4.25)$$

Para poder resolver esta ecuación, es necesario definir ciertas condiciones de frontera que acoten el problema. Las condiciones básicas son temperatura

predefinida: $\theta = \theta(x, t)$, flujo de calor predefinido en superficie: $q = q(x, t)$ y flujo de calor en volumen: $q = r(x, t)$. Además de las anteriores, existen otras dos condiciones de frontera que definen las interacciones del cuerpo o sistema en estudio con el medio: la convección superficial y la radiación [64]

La convección superficial está definida por la expresión $q = h(\theta - \theta^0)$, donde $h = h(x, t)$ es la matriz de coeficientes de transferencia de calor y $\theta^0 = \theta^0(x, t)$ es la temperatura ambiente.

La radiación está definida por la expresión: $q = A((\theta - \theta^Z)^4 - (\theta^0 - \theta^Z)^4)$, donde A es la constante de radiación y θ^Z es el valor del cero absoluto. Para casos en donde existen dos o más superficies con interacción directa de radiación, el software cuenta con una formulación especial llamada cavidad de radiación [60], descrita posteriormente.

La Ecuación 4.25, como se comentó anteriormente, se encuentra definida en tiempo continuo. No obstante, para poder ejecutar la simulación, es necesario, además de discretizar geométricamente el sistema, discretizar el tiempo para que se resuelva en pasos o lapsos cortos del tiempo total. Con lo cual se introduce la Ecuación 4.26 que describe a un operador temporal discreto:

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = (U_{t+\Delta t} - U_t) \left(\frac{1}{\Delta t} \right) \quad (4.26)$$

La cual, al introducirla en la Ecuación 4.25, se tiene entonces la Ecuación 4.27 tal que:

$$\frac{1}{\Delta t} \int_V N^N \rho (U_{t+\Delta t} - U_t) dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} dV - \int_V N^N r dV - \int_{S_q} N^N q dS = 0. \quad (4.27)$$

La Ecuación 4.27 es entonces no lineal. Con el fin de resolver el problema, el software utiliza un método numérico de Newton para buscar la convergencia de la solución, a través de la matriz tangencial (o Jacobiano). El Jacobiano, definido como el cambio de la energía respecto a la temperatura, es decir

$\partial F / \partial \theta_{t+\Delta t}^N$ — donde F corresponde a la parte izquierda de la Ecuación 4.27, se forma a partir de los distintos mecanismos de transferencia de calor al sistema [60].

El término de la energía interna contribuye al Jacobiano de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\Delta t} \int_V N^N \rho \frac{dU}{d\theta} \Big|_{t+\Delta t} N^M dV, \quad (4.28)$$

En tanto que la conductividad proporciona una contribución Jacobiana tal que

$$\int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \Big|_{t+\Delta t} \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot \frac{\partial k}{\partial \theta} \Big|_{t+\Delta t} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{t+\Delta t} N^M dV. \quad (4.29)$$

El primer término de la Ecuación describe el cambio de la energía para una matriz de conductividad k definida en $t + \Delta t$. El segundo término describe el cambio de la energía respecto al cambio de temperatura con una matriz de conductividad dependiente de la temperatura. Dado que la conductividad suele variar muy poco respecto a la temperatura, es habitual omitir este término [60].

En lo que concierne a la radiación y a la convección superficial, su contribución al Jacobiano queda de la siguiente forma:

$$\int_S N^N \frac{\partial q}{\partial \theta} \Big|_{t+\Delta t} N^M dS, \quad (4.30)$$

donde, para convección, se tiene que $\frac{\partial q}{\partial \theta} = \frac{\partial h}{\partial \theta} (\theta - \theta^0) + h$, mientras que para radiación, se tiene que $\frac{\partial q}{\partial \theta} = 4A\theta^3$. Combinando todas las contribuciones, el Jacobiano quedaría de la siguiente forma:

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \int_V N^N \rho \frac{dU}{d\theta} \Big|_{t+\Delta t} N^M dV + \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \Big|_{t+\Delta t} \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} dV + \int_S N^N \left(\frac{\partial h}{\partial \theta} (\theta - \theta^0) + h + 4A\theta^3 \right) N^M dS \right] \bar{c}^M = \int_V N^N r dV + \int_{S_q} N^N q dS - \frac{1}{\Delta t} \int_V N^N \rho (U_{t+\Delta t} - U_t) dV - \int_V \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} dV, \quad (4.31)$$

donde, $\theta_{t+\Delta t, i+1}^N = \theta_{t+\Delta t, i}^N + \bar{c}^N$, y la i es el número de iteración [60].

4.5.2.1 Cavity de radiación

Las cavidades de radiación son colecciones de superficies que están compuestas por caras (o superficies de elementos), las cuales son consideradas isotérmicas y de emisividad uniforme [60].

Para efectuar el cálculo de la radiación emitida y absorbida por cada cara, se efectúa un cálculo de factor de forma ("view factor" en inglés) entre las áreas A_i y A_j que encierran la cavidad, el cual se representa en la Ecuación 4.32 [67]:

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi R_{ij}^2} dA_i dA_j, \quad (4.32)$$

donde, R_{ij}^2 es la distancia entre ambas áreas y ϕ_i, ϕ_j son los ángulos entre R_{ij} y las normales de ambas superficies. En la Figura 4.5 se muestra una representación del factor de forma.

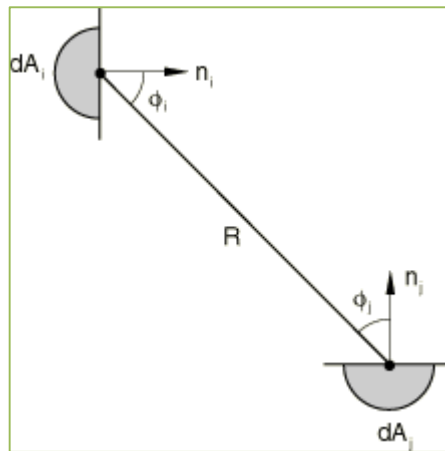


FIGURA 4.5. ESQUEMA DEL CÁLCULO DEL FACTOR DE FORMA. TOMADO DE [60]

Cabe destacar que el software considera el área total de la cavidad como un conjunto discreto de caras o superficies que la conforman, por lo cual, cada factor de forma para cada cara dA_i y dA_j son tales que la sumatoria de todos los factores de forma dan la unidad para una cavidad cerrada, tal que:

$$\sum_j F_{ij} = 1. \quad (4.33)$$

No obstante, en el caso que dicha sumatoria sea inferior a la unidad, se considera que la cavidad es abierta y presenta emisión de radiación al medio ambiente.

Tomando en cuenta el factor de forma, y bajo la asunción de que los cuerpos modelados en el programa son considerados grises (es decir, que la emisividad del cuerpo es independiente de la longitud de onda de propagación de la radiación), la ecuación de flujo de radiación por unidad de área q_j^c para la cara j quedaría de la siguiente forma:

$$\sum_j (\delta_{ij} + (\epsilon_j - 1)F_{ij}) \frac{q_j^c}{\epsilon_j} = \sigma \sum_j F_{ij} \left((\theta_j - \theta^z)^4 - (\theta_i - \theta^z)^4 \right) \quad (4.34)$$

donde, ϵ_i, ϵ_j son las emisividades de las caras i, j ; σ es la constante de Stefan-Boltzmann, F_{ij} es el factor de forma; θ_i, θ_j son las temperaturas de las caras i, j ; θ^z es la temperatura del cero absoluto y δ_{ij} es la delta de Kronecker [68] .

El software, no obstante, suele ejecutar las operaciones en los nodos y no en caras o superficies [60]. Es por ello, que cada cara de las cavidades de radiación, bajo las premisas de ser isotérmicas y de poseer emisividad uniforme, se interpolan estos valores a través de los nodos. Cada nodo tiene una determinada contribución al área o cara a tratar, descrito por la Ecuación 4.35 a continuación:

$$P_i^N = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} N_i^N dA_i, \quad (4.35)$$

donde, A_i es el área y N_i^N es la función de interpolación para la cara i .

Entonces, para calcular la potencia de radiación de temperatura en cada cara, se tiene que:

$$\eta_i = \sum_N P_i^N (\theta^N - \theta^Z)^4 \quad (4.36)$$

donde, N se refiere a los nodos de la cara i .

Así mismo, para calcular el flujo de radiación en cada cara, se efectúa el cálculo usando la siguiente ecuación:

$$Q_i^N = \int_A q_i^C N_i^N dA_i = P_i^N q_i^C A_i, \quad (4.37)$$

donde, q_i^C corresponde al flujo de radiación por unidad de área, visto en la Ecuación 4.34. Entonces, para un nodo N , el flujo de radiación total se tiene dado de la siguiente forma [60]:

$$Q^N = \sum_i Q_i^N \quad (4.38)$$

Existen dos métodos para solucionar las ecuaciones del problema de cavidades de radiación: el método en serie y el método en paralelo. Para efectos ilustrativos, en este capítulo se describe solamente el método en serie, tal como se propone en [60].

Para la solución del problema bajo el método en serie, inicialmente se obtienen los flujos de radiación por flujo de área de la Ecuación 4.34 de forma que:

$$q_i^C = \sigma \epsilon_i \sum_j \epsilon_j \sum_k F_{ik} C_{kj}^{-1} (\eta_j - \eta_i) \quad (4.39)$$

donde:

$$C_{ij} = \delta_{ij} - (1 - \epsilon_i) F_{ij} \quad (4.40)$$

La Ecuación 4.34 requiere el cálculo de la matriz inversa C_{kj}^{-1} , el cual es eficiente y computacionalmente efectivo solamente para cavidades pequeñas. Para el caso de cavidades grandes, se utiliza el método aproximado de solución paralela. Entonces, el flujo de radiación en la cara i puede ser escrito como:

$$Q_i = q_i^c A_i = \sum_j R_{ij}(\eta_j - \eta_i), \quad (4.41)$$

donde:

$$R_{ij} = \sigma \epsilon_i \epsilon_j \sum_k F_{ik} C_{kj}^{-1} \quad (4.42)$$

O de forma más compacta, como se aprecia en la Ecuación:

$$Q_i = \sum_j \bar{R}_{ij} \eta_j, \quad (4.43)$$

donde:

$$\bar{R}_{ij} = R_{ij} - \left(\sum_k R_{ik} \right) \delta_{ij}. \quad (4.44)$$

Sustituyendo entonces la Ecuación 4.38 en la 4.44, se tiene entonces que la contribución de los nodos al flujo de radiación es:

$$Q^N = \sum_M \bar{R}^{NM} \eta^M \quad (4.45)$$

donde:

$$\bar{R}^{NM} = \sum_i \sum_j P_i^N \bar{R}_{ij} P_j^M \quad (4.46)$$

Conociendo entonces el flujo de radiación por nodo, mostrado en la Ecuación 4.45, es posible conocer la tasa de cambio de dicho flujo respecto a la

variación de temperatura en cada nodo del sistema, a través del Jacobiano mostrado en la Ecuación 4.47 a continuación:

$$J^{NM} = \frac{\partial Q^N}{\partial \theta^M} = 4\bar{R}^{NM}(\theta^M - \theta^Z)^3 \quad (4.47)$$

4.5.2.2 Conductividad en elementos tipo armazón (Shell)

Cabe destacar que el Jacobiano presentado en la Ecuación 4.31 funciona para elementos volumétricos, es decir, aquellos cuyos nodos encierran puntos de integración en las tres dimensiones cartesianas como los elementos D3C8, D3C6 o D3C4. No obstante, existe un caso especial para los elementos superficiales (DS3 o DS4), los cuales por lo general suelen sustituir geometrías con espesores definidos. Esto implica tener que resolver las ecuaciones particularmente de conductividad en cada punto de integración a lo largo del vector normal a la superficie del elemento [60].

Para explicarlo de otra forma, se toman las siguientes consideraciones. Sea (ϕ_1, ϕ_2) las coordenadas de un punto de referencia de un elemento *shell*, y s_3 la medida de posición del espesor h del *shell* tal que $-h/2 \leq s_3 \leq h/2$. La posición entonces de algún punto en un elemento *shell* está dado por:

$$x = x^0(\phi_1, \phi_2) + s_3 n(\phi_1, \phi_2) \quad (4.48)$$

donde, x^0 es la posición de algún punto de referencia y n es la unidad normal a la superficie de referencia. Entonces, la interpolación de temperatura para un elemento *shell* se define en la Ecuación 4.49 a continuación:

$$\theta = N^N(\phi_1, \phi_2) M^P(s_3) \bar{\theta}^{NP} \quad (4.49)$$

donde, $M^P(s_3)$ es una interpolación parabólica, $N^N(\phi_1, \phi_2)$ es una interpolación en la superficie de referencia y $\bar{\theta}^{NP}$ son las temperaturas en el nodo N , punto P dentro del espesor del elemento *shell*.

Entonces, como se comentó anteriormente, las ecuaciones de solución del flujo de calor para el caso especial de los elementos *shell* consideran no un volumen explícito, sino la integración de la superficie con los puntos de integración a lo largo del espesor del elemento, de modo que entonces, el primer término de la Ecuación 4.27 correspondiente a la tasa de cambio en la energía interna queda de la siguiente forma:

$$\int_A \left[N^N \int_{-h/2}^{h/2} M^P \rho \dot{U}_{t+\Delta t} ds_3 \right] dA \quad (4.50)$$

y el término del Jacobiano de la Ecuación 4.28 queda de esta forma:

$$\int_A \left[N^N \int_{-h/2}^{h/2} M^P \rho \frac{d\dot{U}}{d\theta_{t+\Delta t}} M^Q ds_3 \right] N^M dA \quad (4.51)$$

Para la contribución del Jacobiano en la Ecuación 4.28, siendo s_3 la medida de posición del espesor, entonces s_1 y s_2 corresponderían a las medidas de posición del largo y ancho respectivamente del elemento *shell*. La contribución de la conductividad al Jacobiano quedaría definida en la Ecuación 4.52 a continuación:

$$\int_A [\beta^N] \left[\int_{-h/2}^{h/2} [\gamma^P]^T [k] [\gamma^Q] ds_3 \right] \{\beta^M\} dA \quad (4.52)$$

donde, β^M y γ^P se definen como:

$$\{\beta^M\} = \left\{ \begin{matrix} N^M \\ \frac{\partial N^M}{\partial s_1} \\ \frac{\partial N^M}{\partial s_2} \end{matrix} \right\} \quad \text{y} \quad [\gamma^P] = \begin{bmatrix} 0 & M^P & 0 \\ 0 & 0 & M^P \\ dM^P/ds_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Finalmente, la Ecuación 4.30 concerniente a los flujos externos quedaría de la siguiente forma:

$$\int_A N^N \left[I^A \frac{dq}{d\theta} \Big|_{t+\Delta t,A} + I^B \frac{dq}{d\theta} \Big|_{t+\Delta t,B} \right] N^M dA, \quad (4.54)$$

donde, I^A es uno en el punto A del espesor, y cero para el resto de los puntos. A y B corresponden a las superficies superior e inferior del elemento *shell* [60].

Convección y difusión

Para el caso de la convección, la formulación en el software puede extenderse para tomar las consideraciones de flujo másico dentro de un sistema. Para ello, se parte de la ecuación de equilibrio térmico para un fluido continuo presente a continuación [69]:

$$\int \delta\theta \left[\rho c \left\{ \frac{\partial\theta}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial\theta}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial\theta}{\partial x} \right) - q \right] dV + \int_{s_q} \delta\theta \left[n \cdot k \cdot \frac{\partial\theta}{\partial x} - q_s \right] dS = 0 \quad (4.55)$$

donde, $\theta(x, t)$ es la temperatura en un punto, $\delta\theta(x, t)$ es un cambio arbitrario variante en el tiempo, $\rho(\theta)$ es la densidad del fluido, $c(\theta)$ es el calor específico del fluido, $k(\theta)$ es la conductividad del fluido, q es el calor añadido por unidad de volumen, q_s es el flujo de calor por volumen en la superficie, n es la normal a la superficie, x es la posición en el espacio cartesiano y t es el tiempo.

Así como en casos anteriores, la primera consideración que se efectúa para poder resolver este problema en el software, es poder discretizar la Ecuación 35 anterior para cada nodo N del sistema en un tiempo discreto $t + \Delta t$. Para ello, inicialmente se efectúa una interpolación de temperatura para cada nodo, de modo que:

$$\theta(x, t) = N^N(x) A^n(t) \theta^{(N,n)}, \quad \text{para } N = 1, 2, \dots, \quad n = t, t + \Delta t \quad (4.56)$$

donde, N^N es la función paramétrica de interpolación nodal, y A^n es la interpolación lineal del tiempo tal que:

$$A^t = 1 - \frac{\tau}{\Delta t}, \quad A^{t+\Delta t} = \frac{\tau}{\Delta t}. \quad (4.57)$$

Con el fin de mejorar la estabilidad numérica en la solución del sistema, en [69] se introduce un término de ponderación a la interpolación definida en la Ecuación 4.56, tal que:

$$\delta\theta = W^N \delta\theta^N = \left[N^N \bar{A} + \frac{h}{2} \left(\alpha \bar{A} + \beta \frac{\Delta t}{2} \frac{d\bar{A}}{dt} \right) \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \right] \delta\theta^N \quad (4.58)$$

donde, v es la velocidad promedio del fluido sobre el elemento, $h = \sum_{\alpha} h_{\alpha}$ es la longitud característica del elemento, h_{α} es la magnitud de la línea isoparamétrica pasando por el centroide del elemento, α es un escalar de ponderación para eliminar difusiones artificiales del sistema y β es un término introducido para evitar dispersiones numéricas. Estos dos últimos términos pueden tener sus valores óptimos de modo que:

$$\alpha = \coth \frac{\gamma}{2} - \frac{2}{\gamma} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{C}{3} - \frac{2}{\gamma C} \alpha \quad (4.59)$$

donde, γ es el número local de Péclet en un elemento y C es el número local de Courant [60]. Sustituyendo entonces la Ecuación 4.58 en 4.55, e integrando para un tiempo $t + \Delta t$, se tiene entonces que la ecuación del equilibrio térmico discretizado es:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \int \rho c \left(N^N + \alpha \frac{h}{2} \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \right) N^M dV (\theta^{M,t+\Delta t} - \theta^{M,t}) \\ & + \frac{1}{2} \int \rho c \left(N^N + \alpha \frac{h}{2} \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \right) v \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} dV (\theta^{M,t+\Delta t} + \theta^{M,t}) \\ & - \beta \frac{h}{4} \int \rho c \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} v \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} dV (\theta^{M,t+\Delta t} - \theta^{M,t}) \\ & + \left(\frac{1}{2} \int \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} dV - \alpha \frac{h}{4} \int \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} k : \frac{\partial^2 N^M}{\partial x \partial x} dV \right) (\theta^{M,t+\Delta t} + \theta^{M,t}) \\ & + \beta \frac{h}{4} \int \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} k : \frac{\partial^2 N^M}{\partial x \partial x} dV (\theta^{M,t+\Delta t} - \theta^{M,t}) \\ & - \int \left(N^N + \alpha \frac{h}{2} \frac{v}{|v|} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \right) q dV - \int_S N^N q_s dS = 0 \end{aligned} \quad (4.60)$$

La Ecuación 4.60 entonces, puede resolverse para el caso tanto de tiempo transitorio como de estado estable. En todo caso, si $\beta = 0$, se omiten el tercer y quinto término de la ecuación, con lo cual, es posible entonces obtener solamente la convección en estado estable, siendo computacionalmente más efectivo.

4.6 Ventajas y desventajas

En la actualidad la práctica de simulación por elemento finito es más común e indispensable en todas las áreas de ingeniería. Las principales **ventajas** de la simulación por elemento finito son las siguientes [70,71]:

a) Costo: Los análisis físicos en la mayoría de las ocasiones requieren de inversión de dinero, tiempo y espacio, que a su vez representan grandes pérdidas en sistemas de manufactura dónde el espacio de almacenamiento y los tiempos muertos representan variables importantes para cumplir la producción. Sin embargo, con el uso de la simulación se pueden realizar fácilmente modificaciones al modelo sin la necesidad de detener o modificar parámetros sobre el proceso en marcha.

b) Tiempo: En la industria automotriz los análisis de fallas pueden tomar días o meses, mientras que dependiendo del modelo y la velocidad del procesador de la computadora a cargo, un análisis puede simular estos fenómenos físicos en horas o días. En un promedio una simulación es 10 veces más rápida que un análisis físico. Además de la comparación del tiempo de análisis, las simulaciones ofrecen una ventaja en el factor de la manufactura de prototipos y en la inversión de mano de obra.

c) Variedad de problemas de ingeniería: Una de las principales ventajas que ofrece la simulación en la industria, es la capacidad de los paquetes computacionales para realizar una amplia variedad de análisis, los paquetes

computaciones más utilizados cuentan con modelos para el análisis de acústica, esfuerzos, fluidos, electrostática, transferencia de calor y estructurales por mencionar algunos.

d) Control de las condiciones experimentales: En una simulación las condiciones de operación quedan definidas y controladas por el usuario, por otra parte, de forma experimental el control de las condiciones de operación (temperatura, presión, etc.) puede llegar a ser muy complicado y costoso.

e) Experimentar con sistemas que aún no existen: Cada día es más común el uso de las simulaciones en la ingeniería, esto permite que los ingenieros de diseño tengan más libertad durante la etapa de desarrollo de nuevos productos al permitirles realizar cambios e innovaciones sobre diseños y tener resultados previos de la funcionalidad del modelo en cuestión antes de realizar un prototipo.

d) Transparencia: Los resultados obtenidos pueden ser mostrados en una forma animada en la pantalla de la computadora ayudando a gente quizás no tan experimentada a interpretar los resultados y tener una mayor confianza en el desarrollo de los modelos.

Las principales **desventajas** de simular por medio de elementos finitos y las cuales no deben pasar desapercibidas son:

a) Solución aproximada: Como cualquier método de modelación, el análisis por elementos finitos ofrece resultados que son aproximaciones al fenómeno observado. Los resultados de un análisis de simulación siempre deberán ser corroborados por análisis físicos. Otro factor a considerar es el nivel de fiabilidad de cada análisis pues este dependerá de la disponibilidad de datos ingresados al sistema (materiales y cargas), el nivel discretización y las condiciones fronteras.

b) Complejidad del modelo: Los modelos utilizados para diseñar sistemas muy complejos requieren de programas excesivamente complicados en los cuales es fácil cometer errores que lleven a falsos resultados, además de requerir una gran cantidad de tiempo para su modelación y para la solución del problema por medio del software.

c) Disponibilidad de datos: Antes de hacer una simulación por elementos finitos es importante contar con los datos suficientes para poder ser alimentados en el modelo. En ocasiones no se dispone de esta información o para obtenerla se pudiera requerir de una gran cantidad de experimentos. De igual forma si se introducen datos erróneos al modelo la solución no será la correcta sin importar que tan sofisticado pudiera ser el mismo.

d) Experiencia: El uso de los paquetes computacionales sin tener una base o fundamento sobre el problema analizado o sobre los métodos de solución que utiliza el paquete para la simulación puede llevar a pésimas interpretaciones de los resultados e incluso a pérdidas de tiempo al no saber que parámetros deben ser modificados en el modelo. Se debe ser cuidadoso al observar las animaciones de los resultados ya que podrían llevar a interpretaciones correctas cuando realmente los resultados están fuera de la realidad.

4.7 Evolución del MEF en el ramo automotriz

El método de elemento finito es una herramienta altamente empleada en la actualidad por la industria automotriz debido a que se obtienen resultados similares a los obtenidos por experimentación física, siendo la simulación más fácil de modificar y crear diferentes modelos para seleccionar el más adecuado a las especificaciones del cliente.

Diferentes compañías están utilizando paquetes computacionales de MEF tales como NASTRAN, ABAQUS/CAE, HYPERWORKS, ANSYS etc.

Con la finalidad de encontrar el mejor prototipo como; motores, convertidores catalíticos, chasis, soportes, moldes, para que este sea fabricado con el menor costo sin dejar a un lado la seguridad y el confort de los ocupantes del automóvil. En la Figura 4.6 se puede apreciar simulaciones de diferentes componentes automotrices.

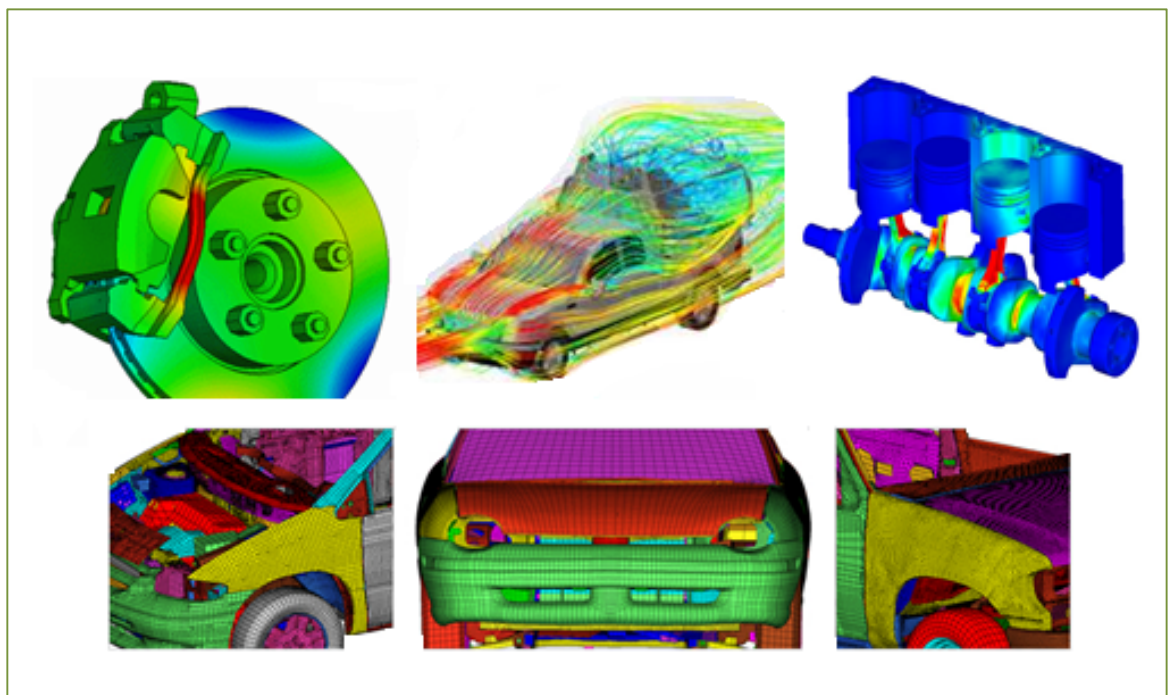


FIGURA 4.6. ANÁLISIS REALIZADOS A COMPONENTES AUTOMOTRICES POR MEDIO DEL MEF.

En el 2013, Zou Bin de la Universidad de Wuhan en China simularon un sistema de escape para observar en el efecto de la temperatura en el colector de escape. Primeramente realizaron un análisis modal concluyendo que era necesario considerar el efecto térmico en el análisis de las frecuencias naturales de vibración. En su trabajo concluyen que debe considerarse el cambio en las propiedades físicas de acuerdo a la temperatura para obtener resultados confiables; el análisis modal fue hecho en Abaqus mientras que el perfil de temperatura se obtuvo con STAR CC+ [72].

Sharda Motor Industries en el 2014 publicó parte de su trabajo en análisis modal y térmico en sistemas de escape. Al igual que Zou Bin se realizó un análisis modal en frío y en caliente pero a diferencia de los anteriores, se efectuó un segundo análisis en caliente aplicando una pretensión en los tornillos dónde existe la restricción del modelo. Concluyendo que más que la pretensión las propiedades físicas seguían siendo el principal factor para la obtención de buenos resultados. Sharda Motor utilizó Abaqus para la solución del problema [73].

Rajadurai en este mismo año realizó un análisis para sustentar la necesidad de un análisis modal en caliente que soporte el diseño de sistemas de escape. Su trabajo vino a apoyar los resultados anteriormente publicados dónde se concluye la importancia de considerar los efectos de la temperatura en las propiedades físicas del material y para la obtención del análisis modal [74].

De la misma manera, Delphi [55], General Motors [75], Toyota [76], entre otros, publicaron otros trabajos que sustentan de buena manera este tipo de análisis así como las conclusiones anteriormente mencionadas.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

5.1 Introducción

A lo largo de los capítulos anteriores se ha expresado el funcionamiento y la aplicación principal de los convertidores catalíticos. La importancia de estos en el ramo automotriz, sus ventajas, desventajas, así como los principios básicos del método de elemento finito. Este capítulo aborda la metodología con la cual se llevaron a cabo las simulaciones para la obtención de los resultados de esta investigación. Además de los diferentes programas que fueron empleados para el pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de las simulaciones realizadas. Los paquetes computacionales empleados en este estudio fueron: NX para la generación de la geometría, Hypermesh para la reparación de la geometría, discretización del modelo y la asignación de propiedades y Abaqus/CAE para la aplicación de condiciones frontera, interacciones, solución del modelo y visualización de los resultados.

5.2 Metodología

La simulación computacional consta de una serie de etapas las cuales se clasifican en pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. Estas etapas se realizaron para el análisis modal a temperatura ambiente, el análisis térmico y el análisis modal a temperatura de operación, que se incluyen en este trabajo de investigación.

La etapa de pre-procesamiento consiste en generar las condiciones necesarias del fenómeno que permitan la identificación de las variables críticas y así idealizar el sistema lo más apegado a la realidad. Esta etapa comprende el diseño de la geometría, la división de la geometría en elementos (discretización), la asignación de propiedades a las regiones de la geometría, la selección del tipo de análisis (declaración de análisis a resolver), designar las condiciones frontera y las consideraciones a las que está sometido el modelo (interacciones).

La etapa de procesamiento comprende los cálculos realizados por el programa, en base a las consideraciones efectuadas por el usuario durante el pre-procesamiento. El tiempo de cómputo es el tiempo necesario para resolver el sistema establecido, este dependerá de las consideraciones realizadas por el usuario en la etapa de pre-procesamiento.

La etapa de post-procesamiento consiste en el despliegue y la extracción de resultados. Los paquetes computacionales detallan los resultados de maneras diversas como; código de colores, tablas o gráficas.

La Figura 5.1 muestra la metodología utilizada en la presente investigación. En las secciones posteriores se detallará ampliamente cada uno de los puntos de la metodología [56,77,78].

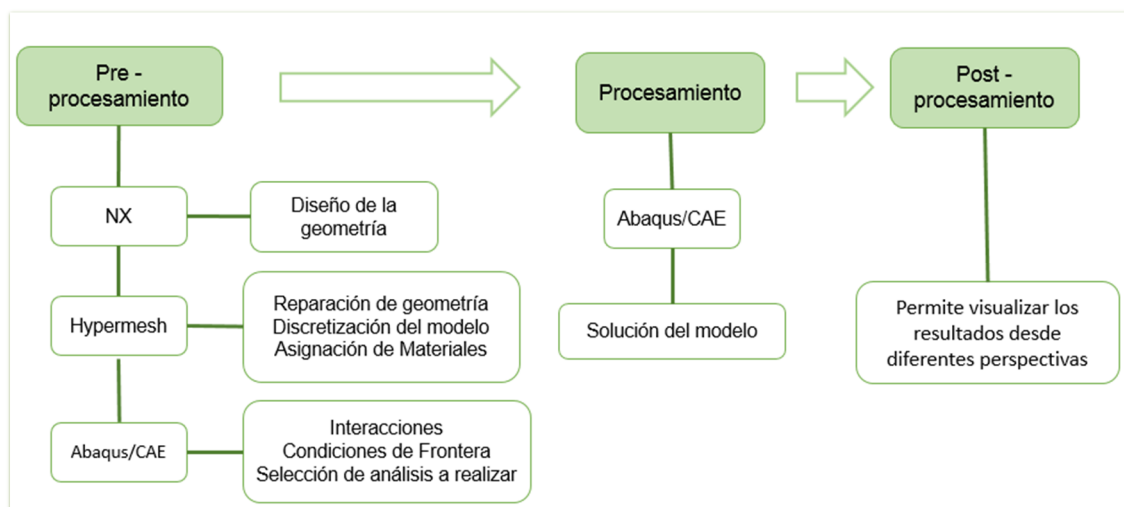


FIGURA 5.1. METODOLOGÍA Y PAQUETES COMPUTACIONES EMPLEADOS PARA LAS SIMULACIONES.

5.3 Detalles de geometría y discretización del convertidor catalítico

El primer paso del pre-procesamiento es la obtención de la geometría, la cual es elaborada por medio de un programa de dibujo asistido por computadora (CAD). La geometría de un convertidor catalítico es complicada por lo cual se requirió emplear el paquete computacional NX, el cual es versátil para la elaboración de diseños complejos por contar con herramientas adecuadas para generar superficies, sólidos, además de que ofrece una gran facilidad para realizar el ensamble. En la Figura 5.2 se muestra la geometría del convertidor catalítico.

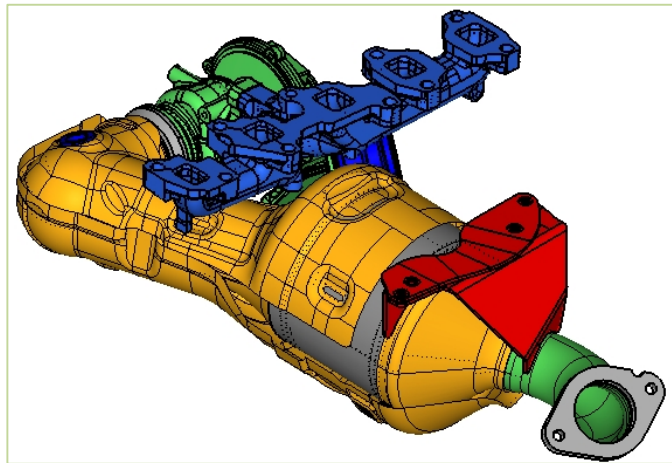


FIGURA 5.2. GEOMETRÍA DE UN CONVERTIDOR CATALÍTICO DISEÑADO POR KATCON LUXEMBURGO.

Por otra parte, la discretización consiste en dividir la geometría en un número finito de elementos. Esta discretización resultará en una solución aproximada a las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de un modelo matemático. El programa computacional Hypermesh fue elegido para realizar la discretización.

El programa Hypermesh cuenta con diversas herramientas, estas herramientas consisten en reparar líneas, superficies, crear sólidos, realizar particiones de la geometría, eliminación de redondeos, etc.

Todas estas técnicas de reparación de geometría son esenciales para la elaboración de una correcta discretización. La Figura 5.3a, muestra la geometría original de un cono de entrada al convertidor catalítico, en esta figura se puede observar una gran cantidad de líneas de construcción producto del programa CAD. La Figura 5.3b muestra la geometría reparada en Hypermesh, donde se eliminaron líneas que dividen a la geometría de una manera irregular. La geometría final reparada debe ser seccionada de tal manera que facilite obtener una discretización homogénea.

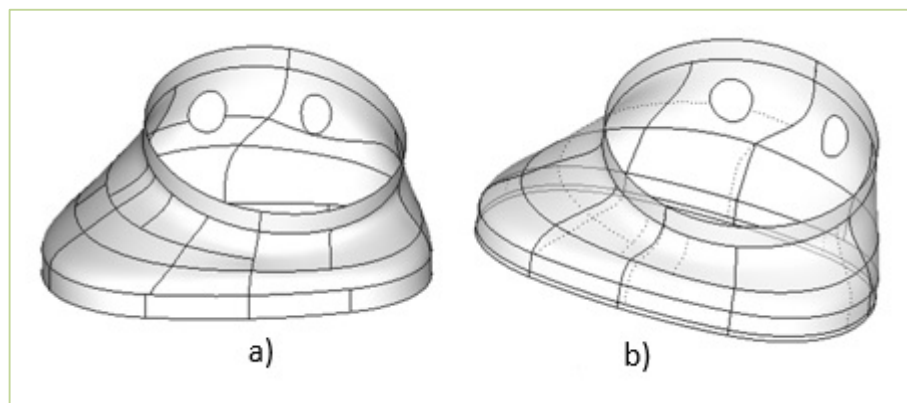


FIGURA 5.3. COMPARACIÓN ENTRE GEOMETRÍA ORIGINAL Y REPARADA. A) MUESTRA LA PRESENCIA DE LÍNEAS QUE AFECTAN EL MALLADO. B) REPRESENTA EL CONO REPARADO CON LAS TÉCNICAS DE LIMPIEZA DE GEOMETRÍA PARA SER MALLADO.

Una vez reparada la geometría, se procede al mallado del modelo, este paso es de suma importancia para obtener resultados confiables en el análisis. Existen diversas consideraciones que deben adoptarse en el proceso de discretización, las cuales se explican a continuación;

a) Tipo de elemento: A menudo el tipo de elemento corresponde al tipo de análisis físico que se desea estudiar.

En algunos casos se tendrá que utilizar dos o más tipos de elementos, esto dependerá del tipo de componente y complejidad. La Figura 5.4 representa los diferentes tipos de elementos en 2D y 3D [56].

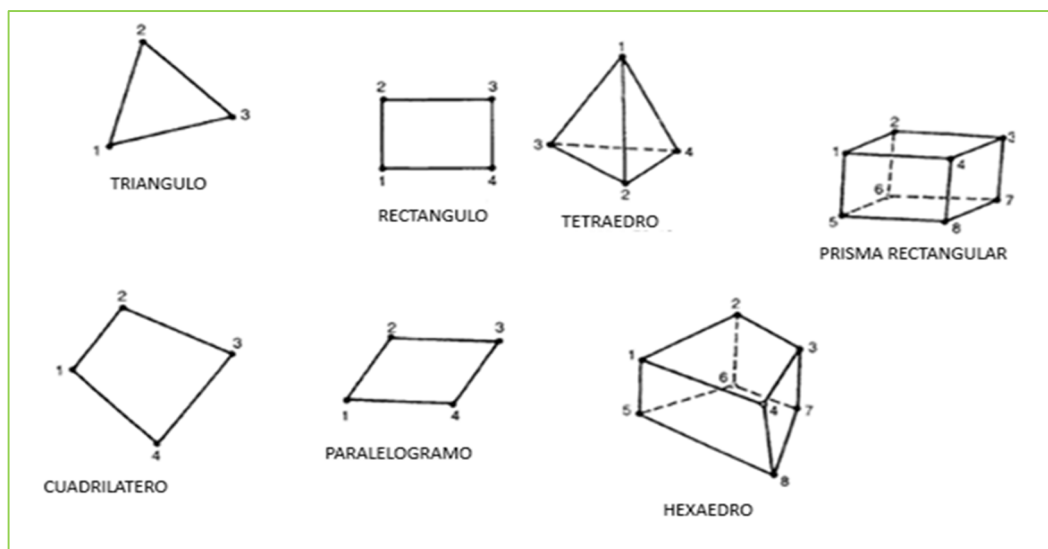


FIGURA 5.4. DIFERENTES TIPOS DE ELEMENTOS EN 2 Y 3 DIMENSIONES [56].

Además de la forma del elemento, se puede asignar un determinado comportamiento a los elementos del modelo, dependiendo del tipo de análisis a resolver. Los elementos empleados por el software Abaqus/CAE 6.13 para esta investigación se listan en la Tabla 5.1 y el desglose de la sintaxis en la Tabla 5.2 [56].

TABLA 5.1. ELEMENTOS EMPLEADOS PARA LOS ANÁLISIS

Elemento	Definición
S4	Elemento 2D de 4 nodos para uso general, deformación finita
S3	Elemento 2D de 3 nodos para uso general, deformación finita
C3D8I	Bloque lineal de 8 nodos, modos incompatibles
C3D6	Prisma triangular de 6 nodos
C3D4	Tetraedro lineal de 4 nodos
DS4	Elemento 2D cuadrilátero de 4 nodos para transferencia de calor
DS3	Elemento 2D triangular de 3 nodos para transferencia de calor
DC3D8I	Bloque de 8 nodos para transferencia de calor
DC3DC6	Prisma triangular de 6 nodos para transferencia de calor
DC3D4	Tetraedro de 4 nodos para transferencia de calor

TABLA 5.2. SINTAXIS DE LOS ELEMENTOS

Nomenclatura	Significado
S	Esfuerzo y desplazamiento continuo para elementos 2D
DS	Transferencia de calor para elementos 2D
C	Esfuerzo y desplazamiento continuo
DC	Transferencia de calor o difusión de masa
3D	Elementos en tres dimensiones

b) Tamaño del elemento: una vez definido el tipo de elemento a utilizar en los componentes, se debe seleccionar el tamaño de elemento de acuerdo a la dimensión de la geometría. La selección de este parámetro es de suma importancia porque influye notablemente tanto en la soldadura entre los componentes, como en la completa discretización de la geometría. La Figura 5.5 muestra un caso de selección de tamaño de elemento.

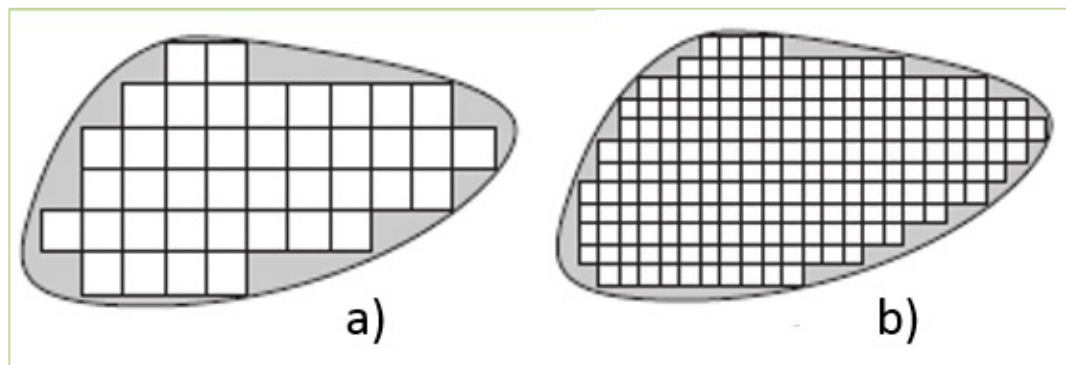


FIGURA 5.5. EJEMPLO DE TAMAÑO DE ELEMENTO. A) DISCRETIZACIÓN CON 41 ELEMENTOS. B) DISCRETIZACIÓN CON 192 ELEMENTOS.

c) Calidad de malla: Hypermesh cuenta con un módulo para verificar la calidad del mallado bajo diferentes indicadores. Estos indicadores funcionan para elementos en 2D y 3D. A continuación se explicarán algunos de los indicadores de calidad del mallado más relevantes [79]:

La relación de aspecto: Es el cociente de la longitud del borde del elemento de mayor longitud sobre el borde del elemento de menor longitud.

Además se podría calcular como la distancia más corta del nodo de una esquina al borde opuesto. Para los elementos 3D cada cara de los elementos es considerada como un elemento 2D.

Jacobiano: Mide la desviación de un elemento de su figura ideal, por ejemplo la desviación de un triángulo a la figura de un triángulo equilátero. Los valores del Jacobiano varían de 0.0 a 1.0, donde 1.0 representa un elemento de figura perfecta. El valor del Jacobiano lo podemos representar como el estiramiento local de un elemento en el espacio el cual es necesario para ajustarlo al sistema global de coordenadas. Hypermesh evalúa el determinante de la matriz Jacobiana en cada elemento de integración y reporta el cociente del valor más alto y más bajo. Para este caso, los valores por encima del 0.7 son aceptables.

Curvatura: Es la desviación de un elemento (en el caso de un elemento 3D, se considera una cara del elemento) a su forma ideal. Partiendo de que tres puntos definen un plano, este parámetro sólo es usado para los elementos cuadriláteros. El elemento cuadrilátero se divide en dos triángulos por su diagonal y el ángulo de las normales de los triángulos es medido.

La Figura 5.6 muestra el mallado completo del diseño analizado, el cual consta de 25 componentes generando una malla de 291,169 elementos y 145,372 nodos.

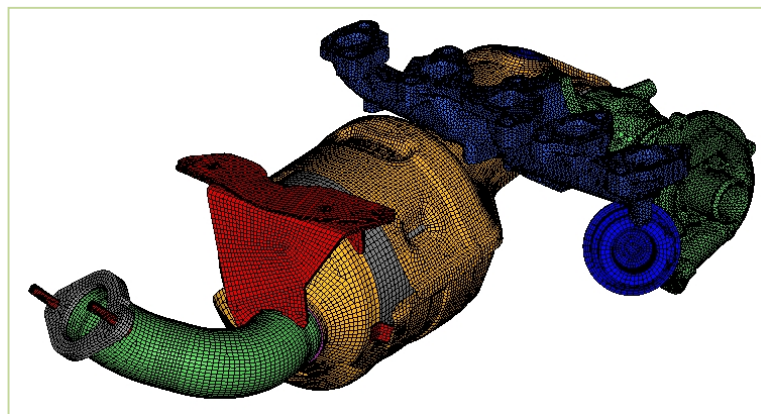


FIGURA 5.6. DISCRETIZACIÓN COMPLETA DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO

Para el mallado de la geometría, se utilizó una variedad de tipos de elementos, con el objetivo de equilibrar los tiempos de cómputo con la precisión de los resultados [79], lo cual se logra por medio de una discretización eficiente. Para geometrías simples y de mayor volumen se optó por utilizar elementos hexaédricos y tetraédricos, ver Figura 5.7 a). Para tuberías y placas delgadas se utilizaron elementos 2D (shell), ver Figura 5.7 b). En los componentes de geometrías más complicadas se designó elementos tetraédricos, ver Figura 5.7 c).

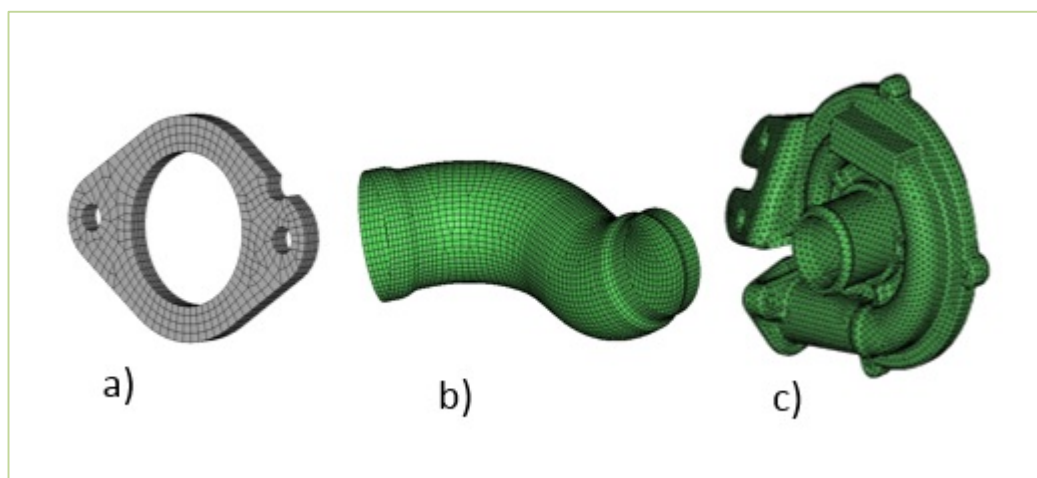


FIGURA 5.7. COMPONENTES MALLADOS. A) ELEMENTOS HEXAÉDRICOS Y TETRAÉDRICOS. B) ELEMENTOS 2D (SHELLS). C) ELEMENTOS TETRAÉDRICOS

Para simular la unión y/o continuidad de la malla entre los componentes dentro de Hypermesh existen tres maneras las cuales son; unión de nodos por medio de equivalencia, soldadura y contactos entre superficies llamados (Ties). Esta conectividad habilita la conducción de calor, el desplazamiento conjunto de todos los componentes y la transmisión de vectores, entre otros comportamientos, habitualmente entre cada uno de los componentes debe existir una conectividad y la cual deberá ser cubierta por una de las opciones antes mencionadas.

La unión por medio de equivalencia es la más deseable ya que conectan directamente un componente con el otro. Este tipo de unión puede emplearse

solamente cuando las superficies en contacto cuenten con la misma cantidad de elementos y que coincidan entre sí.

Los componentes como son la carcasa, aislante térmico y convertidor catalítico, son ejemplos de este tipo de conexión, ver Figura 5.8. La única restricción es que la distancia entre los distintos componentes debe ser lo más pequeña posible para no afectar la morfología de los elementos lo cual conduciría a una distorsión.

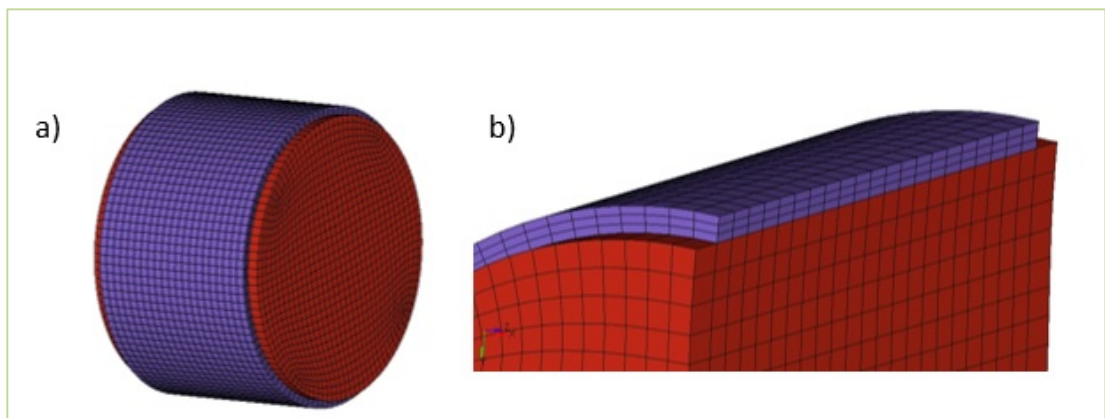


FIGURA 5.8. UNIÓN POR MEDIO DE EQUIVALENCIA ENTRE CONVERTIDOR CATALÍTICO Y AISLANTE TÉRMICO. A) VISTA COMPLETA. B) SECCIÓN TRANSVERSAL

La opción de soldadura es empleada cuando los componentes tengan los mismos elementos pero se encuentran a una distancia donde no pueden ser unidos por medio de equivalencia, al tener la misma cantidad de nodos es posible crear elementos llamados soldadura que le darán continuidad al sistema y representan la unión de ambos componentes, ver Figura 5.9. Los elementos que representan soldadura tienen propiedades de un acero inoxidable 441 y establecen la unión de los componentes y no la soldadura real en sí. La unión puede generarse en 2D o 3D.

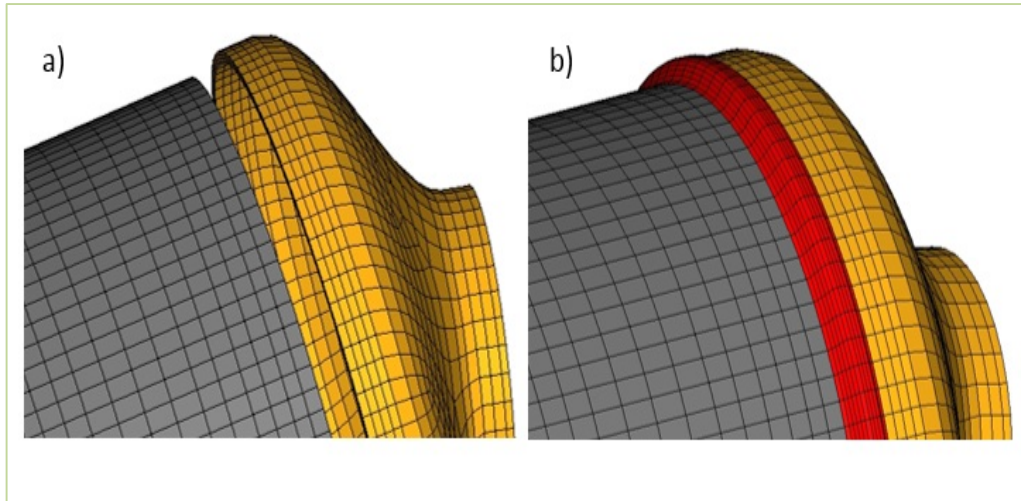


FIGURA 5.9. SOLDADURA ENTRE LOS COMPONENTES CARCASA (GRIS) Y CONO (AMARILLO). A) COMPONENTES SIN SOLDADURA DONDE NO HAY UNIÓN ENTRE ELLOS. B) SOLDADURA (ELEMENTOS EN COLOR ROJO) EN EL ESPACIO VACÍO ENTRE CARCASA Y CONO.

Las conexiones ó contactos son denominados dentro del software como “ties” y son la tercera alternativa para realizar la unión de componentes. Los “ties” son empleados cuando por la dificultad del modelo ni la soldadura ni la equivalencia logran realizar dicha unión, debido a que las superficies de los componentes no coinciden en el número de elementos entre sí. Los “ties” son una herramienta disponible en Hypermesh y para generarlos es necesario seleccionar dos superficies de elementos (superficies shell en 2D). Una superficie es declarada como "maestro" y la contraparte como "esclavo", ver Figura 5.10. La superficie "maestro" rige de cierta manera el comportamiento de la superficie "esclavo", por ejemplo al desplazarse el ensamble, el modo de desplazamiento que suceda en la superficie "maestro" va ser seguido por la superficie "esclavo". Este tipo de unión tiene la desventaja que el software tiene que hacer cálculos adicionales en la etapa de procesamiento, lo que requiere más tiempo de cómputo.

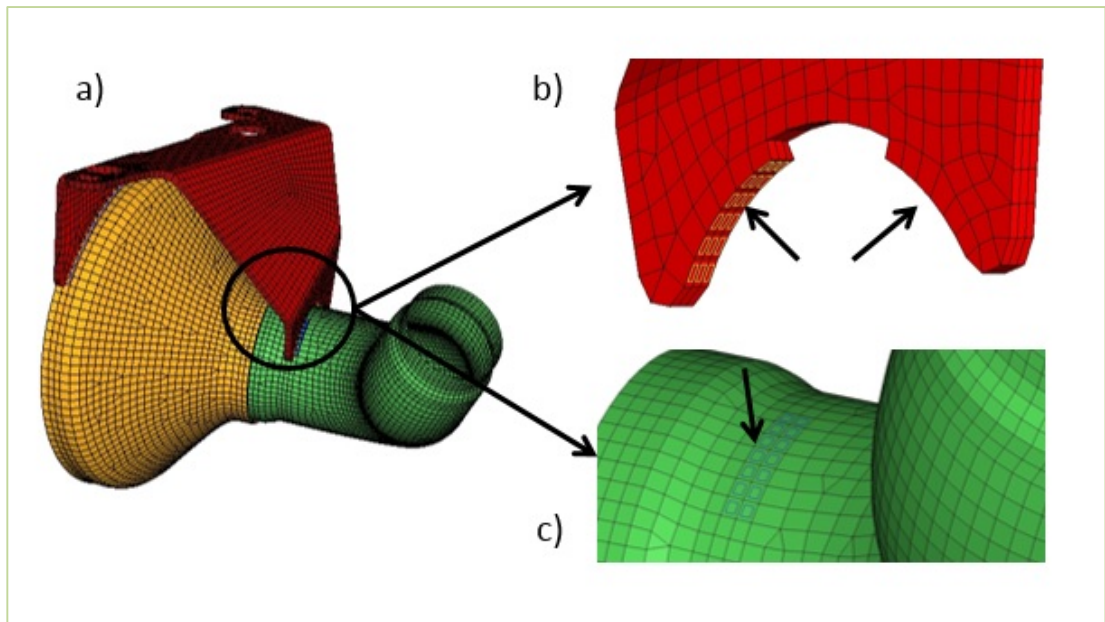


FIGURA 5.10. CONTACTO TIE. A) TIE GENERADO ENTRE EL SOPORTE, TUBO DE SALIDA Y CONO DE SALIDA. B) SUPERFICIE "MAESTRA" EN EL SOPORTE. C) SUPERFICIE "ESCLAVA" EN EL TUBO DE SALIDA.

Las tres maneras para la continuidad de la discretización son empleadas dentro de los convertidores catalíticos, ya que por la dificultad para discretizar el modelo es necesario el uso de los tres tipos de unión para generar un buen pre-procesamiento.

Una vez lista la discretización, el siguiente paso es asignar las propiedades de los materiales y establecer condiciones frontera, interacciones y el tipo de análisis a resolver. Estos pasos se abordaran en las secciones siguientes.

5.4 Análisis térmico por medio del MEF.

El análisis térmico es una simulación multifísica y tiene como objetivo encontrar la temperatura de cada uno de los componentes cuando los gases de escape pasan a través del sistema. Para llevar a cabo este análisis es indispensable seguir con la metodología presentada en la Figura 5.1.

Para el pre-procesamiento, como se mencionó en el punto anterior la geometría fue diseñada en el paquete CAD NX unigraphics y el mallado en el software Hypermesh.

Una vez que se cuenta con una malla adecuada se procede a la asignación de materiales a cada componente, en la Tabla 5.3, se muestran las propiedades térmicas empleadas para el análisis.

TABLA 5.3. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.

Conductividad Térmica (W/m K)	
AISI 441	27
AISI 409	27
Interam 100	0.171
SIMO 51	25
Cordierita	0,46
Coeficiente de Expansión	
AISI 441	1.29E-05
AISI 409	1.29E-05
Interam 100	2.90E-05
SIMO 51	1.35E-05
Cordierita	7.60E-07

Una vez que son declaradas las propiedades de cada material y asignadas a cada componente dentro de Hypermesh, se procede a exportar la malla a el software Abaqus/CAE para crear el tipo de análisis a resolver. Las interacciones y condiciones frontera se detallaran a continuación.

La transferencia de calor en estado estable es el tipo de análisis que debemos seleccionar para que el software realice los cálculos necesarios con las condiciones de entrada que son declaradas al modelo y con el cual podemos observar la disipación de calor a lo largo del sistema y obtener la temperatura en cada componente.

TABLA 5.4. INTERACCIONES POR CONVECCIÓN DECLARADAS PARA EL ANÁLISIS TÉRMICO.

Interacciones por convección		
Sección	Temperatura de referencia (°C)	Coeficiente de convección (mW/mm ² K)
Sensor	250	0.2
Tornillos	80	0.4
Soporte de salida 01 y 02	80 Y 80	0.4 y 0.05
Escudo térmico frontal	80	0.05
Escudo térmico trasero	80	0.03
Tubo salida	80	0.05
Brida de salida	80	0.05
Cono salida sin escudo térmico	80	0.05
Carcaza sin escudo térmico	120	0.03
Soporte principal	120	0.05
Turbo y el conector escape	200	0.04
Escudo térmico interno	200	0.005
Cono, carcaza y tubo entrada con escudo térmico.	200	0.005

TABLA 5.5. INTERACCIONES POR RADIACIÓN DECLARADAS EN EL ANÁLISIS TÉRMICO.

Interacciones por radiación		
Sección	Temperatura de referencia (°C)	Emisividad del material
Cono salida con escudo térmico / frontal.	200	0.8
Carcaza con escudo térmico / frontal	200	0.8
Carcaza con escudo térmico/ trasero.	200	0.8
Tubo entrada con escudo térmico /frontal.	200	0.8
Tubo entrada con escudo térmico / trasero	200	0.8
Tubo salida	200	0.8
Soporte principal	200	0.67
Cono salida sin escudo térmico	200	0.8
Carcaza sin escudo térmico	200	0.8

En las Tabla 5.4 y Tabla 5.5, se muestran las interacciones de convección y radiación las cuales fueron establecidas al modelo dentro del software Abaqus/CAE.

Las interacciones presentadas en las Tabla 5.4 y Tabla 5.5, solo nos representan las condiciones externas a las que el modelo está sometido, sin embargo para definir las interacciones internas debemos emplear los resultados del análisis de fluidos dinámicos. Para poder realizar la correcta interacción, debemos contar con los resultados de los análisis de fluidos dinámicos en formato con extensión (bdf). Dentro de este archivo se encontrarán las temperaturas y los coeficientes de convección de los gases de escape. Como los resultados de fluidos dinámicos fueron calculados por medio de volumen finitos se realizó la programación para poder convertir las unidades y crear el archivo en una forma de lectura la cual es la adecuada para que el software de MEF pueda importar estos resultados. El programa se realizó por medio de Python. La Figura 5.11 muestra el acomodo de las interacciones internas asignadas al convertidor catalítico.

Numero de elemento	Temperatura de los gases F	Coeficiente de convección del gas W/m ² °K
71310	FPOS,930.85	0.240427
71311	FPOS,930.74	0.247064
71312	FPOS,930.79	0.242059
71313	FPOS,930.75	0.247092
71314	FPOS,930.79	0.242295
71315	FPOS,930.41	0.305055
71316	FPOS,930.48	0.293137

FIGURA 5.11. REPRESENTACIÓN DEL ORDEN QUE DEBE TENER LAS CONDICIONES FRONTERA AL PASAR LA BASE DE DATOS DE FLUIDOS DINÁMICOS A ELEMENTO FINITO.

La Figura 5.12 se presentan las temperaturas y los coeficientes de convección que fueron exportados por el software de fluidos dinámicos Ansys fluent.

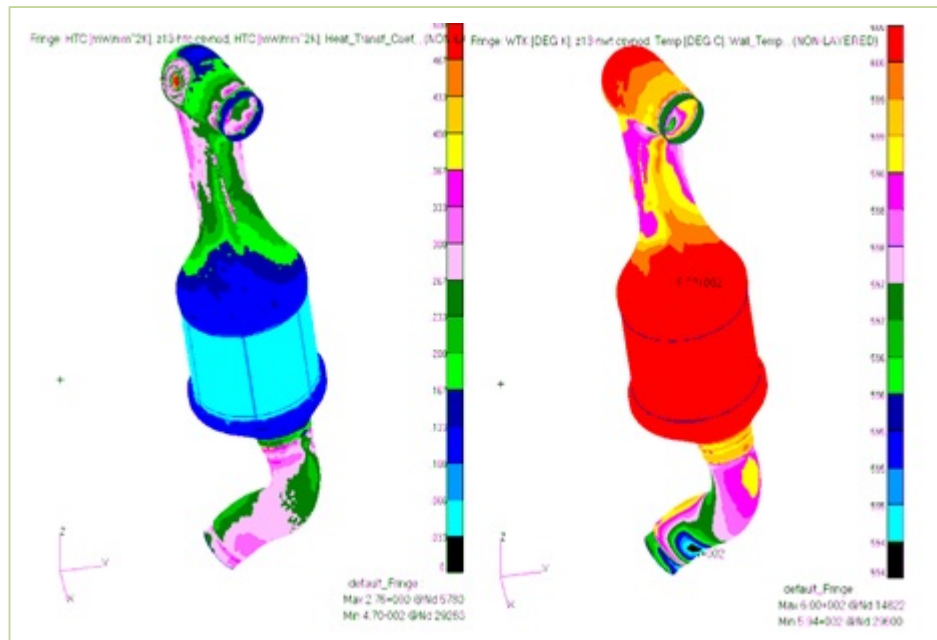


FIGURA 5.12. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CFD, LA FIGURA MUESTRA (IZQ) VALORES DEL COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR $W/m^2 K$ Y (DER) TEMPERATURA $^{\circ}F$ UTILIZADOS COMO CONDICIONES DE FRONTERA PARA EL ANÁLISIS TÉRMICO.

Estos valores de temperaturas y coeficientes son utilizados para crear la convección interna del convertidor catalítico. Una vez establecidos estos valores se procede a mandar resolver el análisis para que el software realice los cálculos en cada uno de los elementos del sistema. Teniendo un total de 12 incrementos para encontrar la convergencia del modelo.

5.5 Análisis modal a temperatura ambiente y de funcionamiento por medio del MEF

El análisis modal tiene como principal objetivo calcular las frecuencias naturales del modelo, para llevar a cabo la configuración del análisis es necesario contar con el modelo previamente discretizado y a partir de ahí importar el modelo a Abaqus/CAE. Al importarla se debe verificar la calidad de la malla, ya que fue desarrollada en otro software (Hypermesh). Igualmente se debe verificar si no contiene errores o distorsiones en algún elemento, lo anterior se realiza abriendo el módulo de malla, en el cuál se

verifica y se configura el tipo de elemento (3D stress) una vez realizado lo anterior se prosigue con la asignación de las propiedades a cada material para este caso se muestran los materiales empleados y las propiedades de los mismos en la Tabla 5.6.

TABLA 5.6. PROPIEDADES CRÍTICAS PARA ANÁLISIS MODAL

	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson
AISI 441	207872	0.24
AISI 409	206153	0.3
Interam 100	18	0.05
SIMO 51	172500	0.28
Cordierita	9000	0.25
Densidad (Kg/m ³)		
AISI 441	7800	
AISI 409	7800	
Interam 100	1000	
SIMO 51	6850	
Cordierita	5000	

Para que Abaqus pueda resolver el modelo es necesario indicar que tipo de análisis se pretende resolver. En el caso de un análisis de frecuencia modal, es necesario emplear el método Lanczos (este análisis se detalla en la sección 4.5.1), para la extracción de los valores característicos. Para este estudio se calcularon las 10 primeras frecuencias naturales del sistema a temperatura ambiente y temperatura de operación.

Las interacciones que son declaradas en el modelo son elementos de masa y un resorte al terminar el tubo de salida, lo anterior con la finalidad de simular el componente subsecuente de este modelo que es un tubo flexible.

Las condiciones frontera declaradas restringen el movimiento del convertidor catalítico en los soportes, esta restricción simula la unión entre los soportes y el exterior del sistema. El colector de escape y el soporte de salida son las condiciones frontera que representan la unión fija del convertidor catalítico con otras partes del auto tal como se muestra en la Figura 5.13.

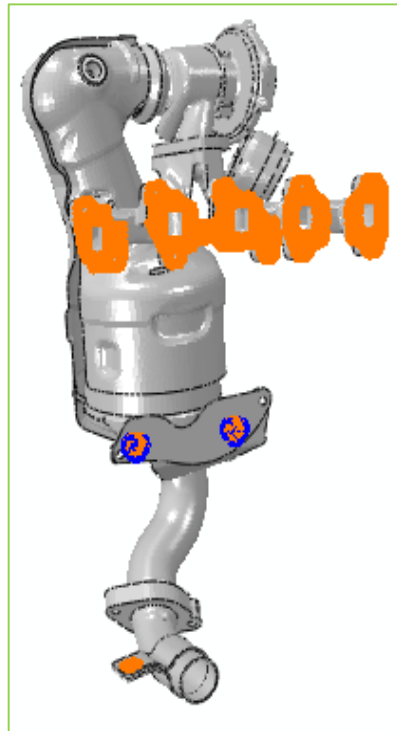


FIGURA 5.13. CONDICIONES FRONTERA. LA FIGURA INDICA LAS ÁREAS DONDE EXISTE RESTRICCIÓN PARA LOS 6 GRADOS DE LIBERTAD DEL SISTEMA.

Una vez declaradas las condiciones fronteras se procede a resolver el análisis modal a temperatura ambiente. Para resolver el análisis modal a temperatura de funcionamiento se deben considerar las temperaturas obtenidas en el análisis térmico; simplemente se integran como condición de frontera los resultados del análisis térmico descrito en la sección 5.4 y una vez que los componentes alcanzan la temperatura real de operación, se procede a resolver el análisis modal a temperatura de funcionamiento.

En el siguiente capítulo se detallarán los resultados de estos análisis.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Introducción

En el presente capítulo, se detalla el análisis de los resultados del modelo térmico y de frecuencias naturales (modales) obtenidos en el ensamble completo del sistema de escape, así como la discusión de los mismos. Inicialmente, se visualizan las temperaturas que el análisis térmico arroja como solución. Posteriormente, se presentan los modos y sus respectivos valores de la solución al problema de las frecuencias naturales del sistema.

Finalmente, y como forma de validar estos resultados, se efectúa una correlación entre los valores obtenidos en la simulación y los valores que las pruebas físicas determinan.

6.2 Análisis Térmico

El análisis térmico, acorde a lo estipulado en el capítulo anterior, se efectúa haciendo distintas consideraciones:

- La convergencia de solución se asegura analizando el sistema en el tiempo estable (no transitorio) [50].
- Las temperaturas y los coeficientes de convección al interior de las cavidades del extremo caliente se obtienen a través de una previa simulación de fluidos dinámicos [80,73].
- La temperatura del catalizador es fija y uniforme, a 720°C [55].

- El análisis del sistema se efectúa en condiciones aisladas y no en las condiciones de trabajo (junto al motor de combustión interna), por lo que la temperatura circundante al sistema se fijó a temperatura ambiente (80°C).

En base a lo anterior y revisado los datos del modelo, a través de la plataforma de Abaqus/CAE se resolvió y se obtuvieron los resultados presentados a continuación.

La Figura 6.1, muestra el sistema completo en distintos colores representando la temperatura en estado estable que alcanza el sistema bajo las condiciones iniciales citadas con anterioridad. La gama de colores para el resto de las representaciones térmicas va desde el color azul (más frío) al color rojo (más caliente). A simple vista, se visualiza que las secciones más frías corresponden a los soportes (brackets) y el escudo térmico (heat shield), en tanto que las más calientes son encontradas en el múltiple de escape (exhaust manifold) y en el catalizador (no visible en la imagen). Estos resultados concuerdan con las condiciones reales de trabajo de un sistema típico de escape [19,55,89]. La diferencia entre los resultados obtenidos con el modelo y las de operación se muestra en la Tabla 6.2.

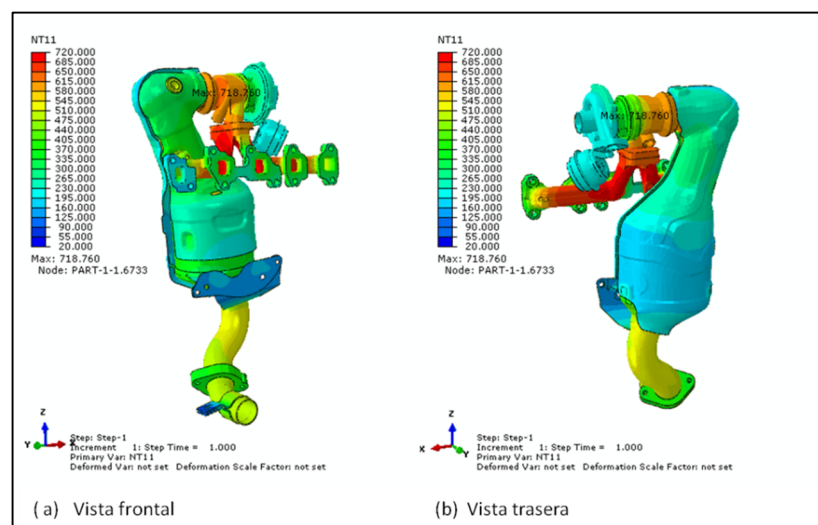


FIGURA 6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TÉRMICO DEL SISTEMA DE ESCAPE COMPLETO.

Al remover el escudo térmico del sistema, se aprecia una relativa uniformidad en las temperaturas de operación (Figura 6.2). La temperatura máxima de casi 720°C en el múltiple de entrada se reduce hasta alrededor de 540°C en los tubos de entrada y de salida. Además, se observa que la carcasa (shell) que contiene el catalizador está a una temperatura de operación inferior (Aproximadamente 90 °C) a la de los tubos que lo conectan, ya que éste está sostenido por una fibra que también funciona como aislante térmico. Como se mencionó anteriormente estos aislantes tiene como función proteger al sistema de las altas temperaturas [23].

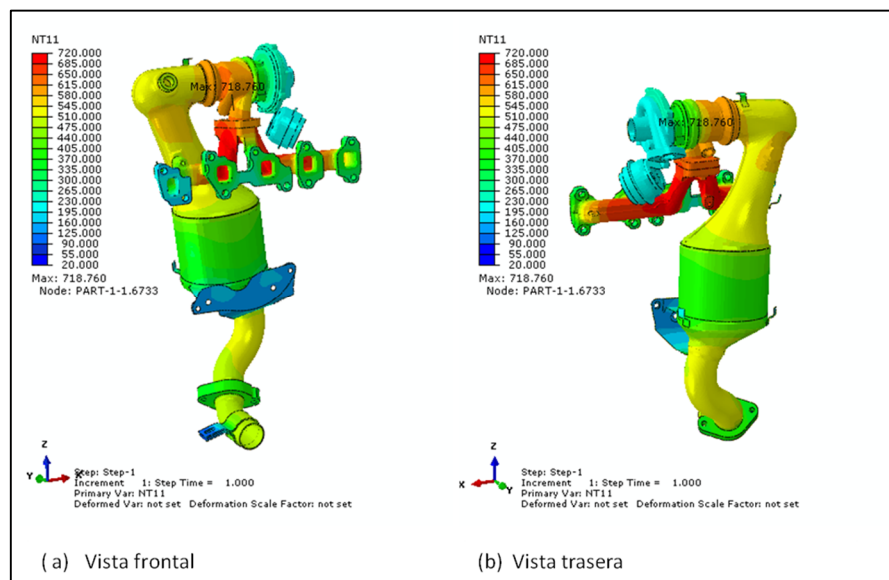


FIGURA 6.2. ANÁLISIS TÉRMICO DEL SISTEMA DE ESCAPE SIN ESCUDO TÉRMICO

Continuando con el desglose de los resultados de las simulaciones térmicas, en la Figura 6.3a se aprecia el escudo térmico aislado, vista frontal, la cual muestra su cara con la temperatura más elevada, siendo su pico máximo de 501°C en uno de los puntos de soldadura con el tubo de entrada del sistema. Este punto de contacto, junto con la radiación y convección en la cavidad formada entre el tubo de entrada y el escudo térmico promueve que la temperatura de operación en esa región se eleve a 350°C. En la parte inferior, que forma cavidad con la carcasa es evidente una zona más templada con temperatura promedio de 250°C, exceptuando en el otro punto de soldadura, donde al igual que la anterior, es un punto caliente y ésta última alcanza los

350°C. Es común encontrar que las soldaduras son los puntos más calientes en el escudo térmico debido a que los materiales empleados tienen altos valores de conductividad térmica.

En la Figura 6.3b, la temperatura del escudo térmico tiende a ser uniforme. Esto, posiblemente se atribuye a que la distancia hacia el tubo de escape sea mucho mayor como para que el espacio inscrito en la cavidad, desde luego con aire, aisle lo suficiente como para mantener el escudo térmico en temperaturas que rondan los 225°C en promedio.

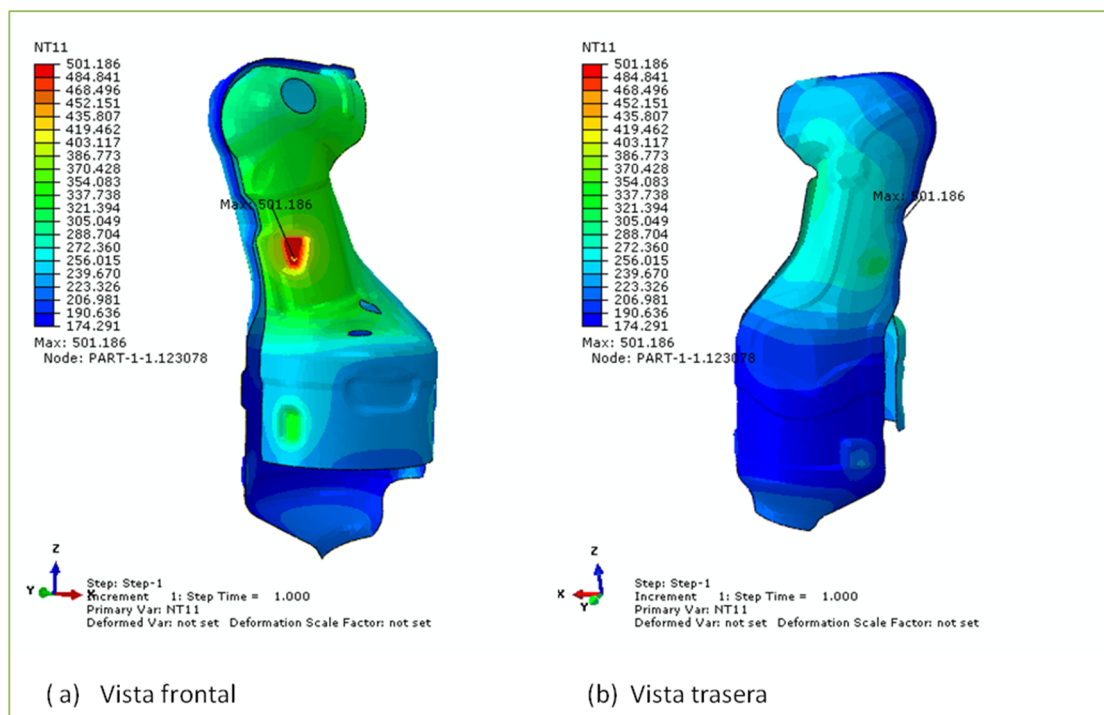


FIGURA 6.3. ANÁLISIS TÉRMICO DEL ESCUDO TÉRMICO

Aislando el tubo de entrada, en la Figura 6.4 se muestra la variabilidad en temperaturas desde la brida de entrada hasta el cono que conecta a la carcasa del catalizador. Dado que el turbocompresor tiene sus temperaturas de operación cercanas a las máximas del sistema (posteriormente se analizará esta región), la brida presenta una temperatura promedio de 600°C, mientras que a lo largo del tubo, la temperatura es relativamente consistente y presenta un promedio de 550°C. Cabe destacar que, por efectos en la dinámica del flujo de gases calientes en tubos con doblez, en el ángulo

externo de dicho doblez suele encontrarse a temperatura menor (alrededor de 510°C) a contraste del ángulo interno, con temperaturas cercanas a los 570°C.

En contraste, la zona con la temperatura más baja corresponde a la que conecta con la carcasa del catalizador. Dado que está, como se comentó anteriormente, suele estar a temperaturas más frías (340°C), el equilibrio térmico que se adquiere en esa zona del tubo de entrada ronda los 470°C.

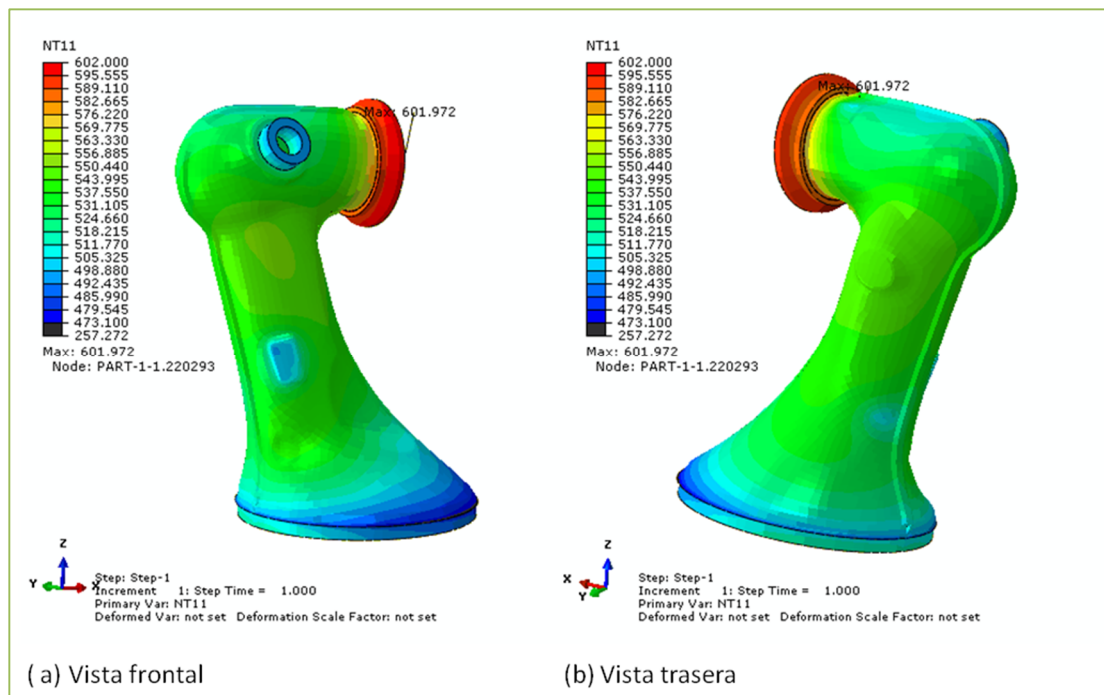


FIGURA 6.4. ANÁLISIS TÉRMICO DEL TUBO Y BRIDA DE ENTRADA

Para el caso del múltiple de escape y del turbocompresor, como se puede ver en la Figura 6.5, la temperatura máxima se encuentra en el múltiple y está justo en el ángulo donde intersectan los flujos de las cuatro cavidades de entrada, la cual ronda los 700°C. Así mismo, la turbina del turbocompresor suele estar operando a temperaturas cercanas a las máximas, en este caso, alrededor de los 670°C. Los resultados de temperatura obtenidos en la simulación térmica son similares con los resultados encontrados en las pruebas físicas, cómo se puede apreciar en la Tabla 6.2.

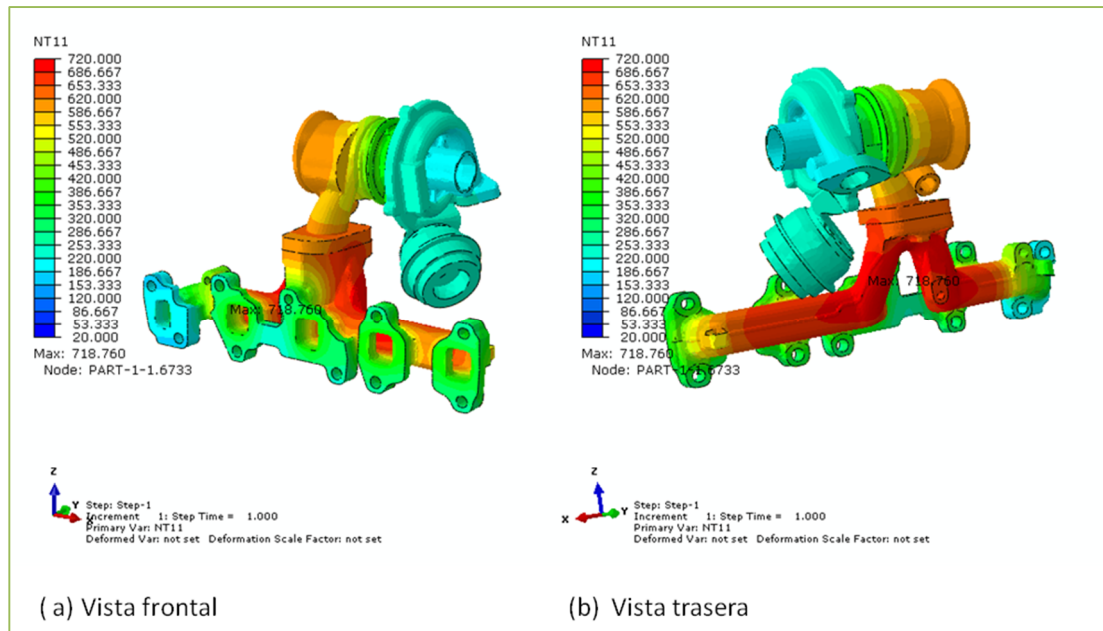


FIGURA 6.5. ANÁLISIS TÉRMICO DEL MÚLTIPLE DE ESCAPE Y TURBOCOMPRESOR

Finalmente, en la Figura 6.6, se aprecian las temperaturas a las cuales se encuentran los soportes del sistema, el tubo de salida y la carcasa (componente que cubre y protege al catalizador). Se puede observar que la temperatura en el exterior de la carcasa se comporta de manera uniforme, promediando 340°C . Lo anterior debido a que entre el catalizador (760°C) y la carcasa se cuenta con material aislante de manera que se evita un sobrecalentamiento en dicha carcasa. En el tubo ubicado en la salida del sistema se aprecia que posee una temperatura uniforme alrededor de 540°C , temperatura similar a la obtenida en el tubo de entrada. Por otra parte los soportes alcanzan temperaturas de entre 100°C y 120°C .

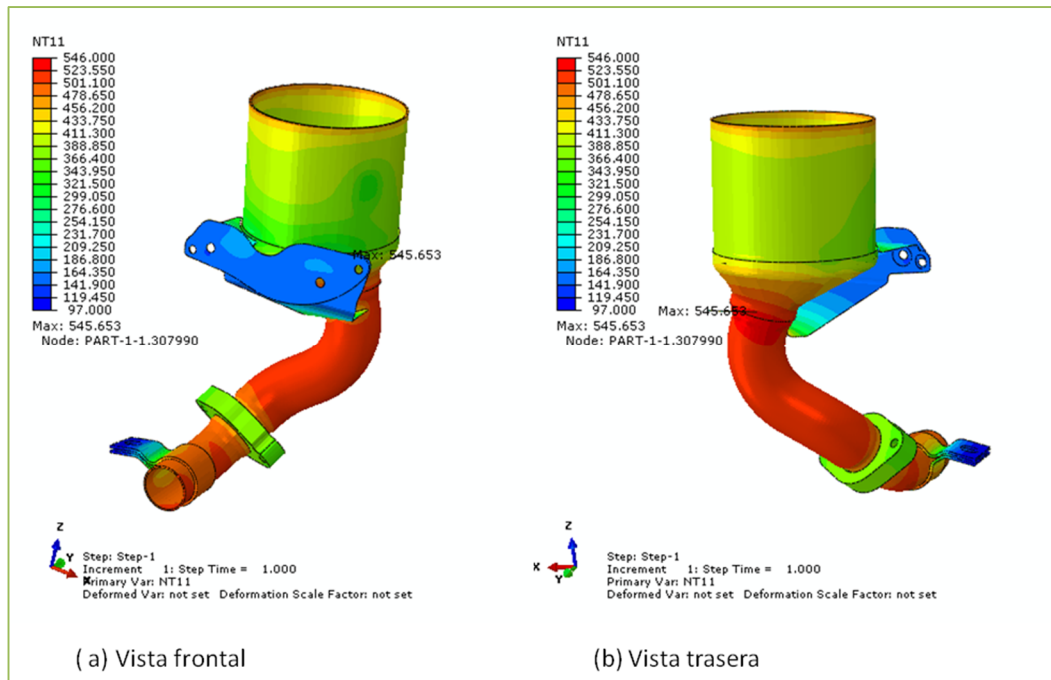


FIGURA 6.6. ANÁLISIS TÉRMICO DE CARCASA, TUBO DE SALIDA Y SOPORTES

Concluyendo con los resultados de la simulación térmica y como dentro del objetivo del proyecto se encuentra validar dicha simulación, es necesario hacer referencia a los resultados de la prueba física la cual se explica a mayor detalle en una sección posterior, de tal manera que si se observan dichos resultados los cuales se encuentran en la Tabla 6.2 se puede concluir que los rangos de temperatura resultantes del análisis térmico son equivalentes a los rangos de temperatura obtenidos en la experimentación. Por lo cual siempre y cuando el análisis por medio de MEF y la prueba experimental utilicen las mismas condiciones frontera, se tendrá la certeza que los resultados por medio de MEF serán confiables y similares a los experimentales.

6.3 Análisis Modal

El análisis modal o de frecuencias naturales, acorde a lo que se estipuló en los capítulos previos, se efectúa obteniendo los valores característicos de la matriz de rigidez del sistema completo. La rigidez del sistema está en función del módulo elástico de los materiales, y dicho módulo está a su vez

definido en función de la temperatura. Dadas las temperaturas de operación de un sistema de escape, es evidente que la matriz de rigidez variará de forma importante respecto a una prueba en frío, por lo cual se decide ejecutar dos análisis modales, uno a temperatura ambiente y el segundo a las temperaturas en estado estable de operación (obtenidas del análisis térmico).

Para ejecutar dicho análisis, se parte de una serie de consideraciones citadas a continuación:

- Las condiciones de frontera del sistema son de naturaleza completamente rígida [81,82].
- La temperatura ambiente para el análisis modal frío es de 20°C.

Una vez verificados los datos y revisado el modelo dentro del software Abaqus/CAE se procedió a ejecutar el análisis modal en frío, y posteriormente el análisis modal en caliente. Los resultados son presentados y desglosados a continuación.

En la Figura 6.7 se muestra una comparativa entre los valores de frecuencia del análisis modal en frío y el análisis modal en caliente. Normalmente se tiene la expectativa de valores de frecuencia superiores a los 200Hz, con el fin de sobrepasar ampliamente las frecuencias de operación típicas de un motor de combustión interna, y así evitar que el sistema entre en resonancia [82]. La diferencia en los valores de frecuencia de ambos análisis modales es, en promedio, de 11%, siendo la diferencia más notoria la del segundo modo, con una diferencia de 21% en su valor de frecuencia.

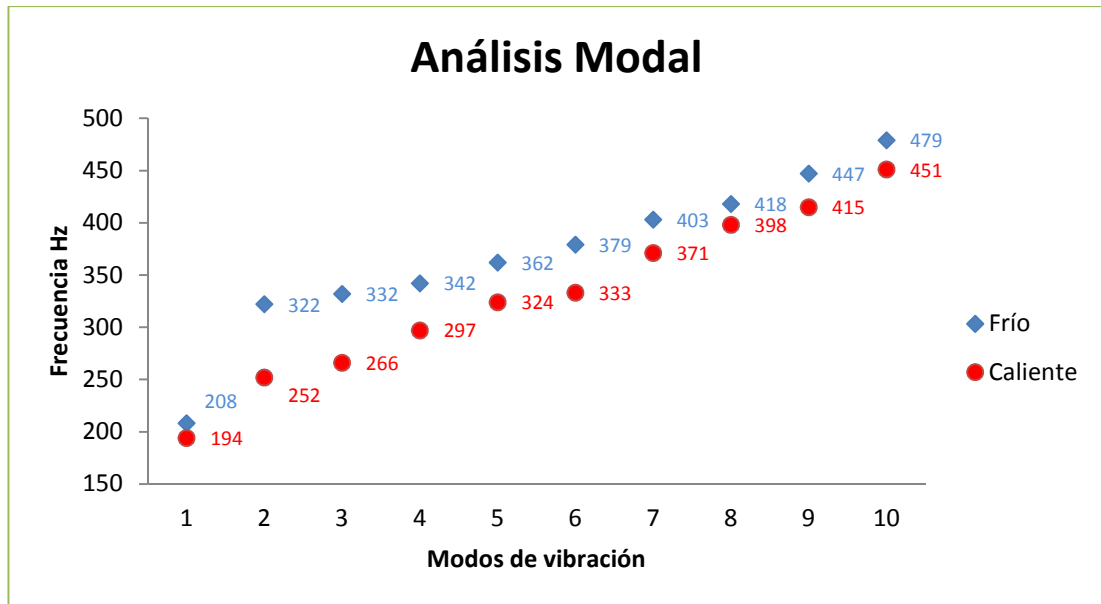


FIGURA 6.7. RESULTADOS DE LAS FRECUENCIAS NATURALES EN FRÍO Y EN CALIENTE.

En la Figura 6.8 se muestra que el modo 1 se encuentra a 208.26Hz a temperatura ambiente y a 193.83Hz a temperatura de operación, es decir, representando una diferencia del 6.7%. Acorde a las gráficas de desplazamiento (U), en este modo, el principal componente oscilatorio es el escudo térmico, particularmente la parte superior, la cual es la más alejada del punto de soldadura [56].

En la Figura 6.9 el modo 2 en frío diverge notoriamente del modo 2 en calor. Para el análisis a temperatura ambiente, la frecuencia natural determinada fue de 321.99Hz, en tanto que la determinada para el análisis a temperatura de operación fue de 251.66Hz, una diferencia superior al 21%. Se puede apreciar además que el movimiento oscilante principal de ambos modos se produce en el escudo térmico.

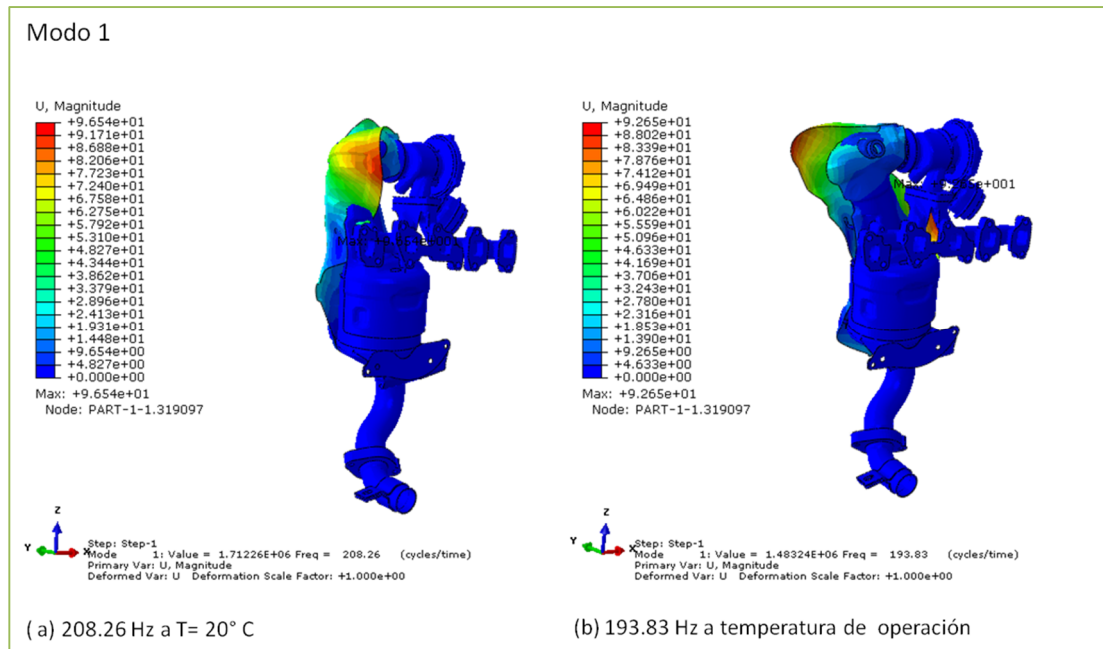


FIGURA 6.8. ANÁLISIS MODAL: MODO 1

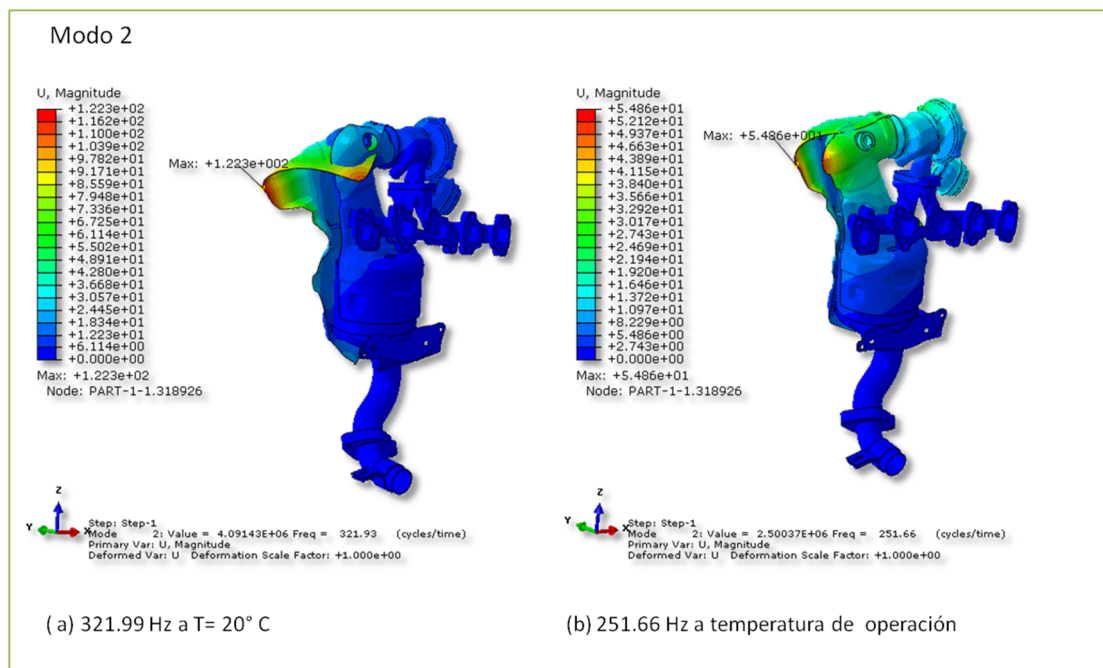


FIGURA 6.9. ANÁLISIS MODAL: MODO 2

La Figura 6.10 muestra el modo 3 en frío y en caliente, a 331.87Hz y 265.96Hz, respectivamente, siendo ésta una diferencia del 19%. En este modo, gran parte de los componentes oscilan, como se puede ver en la gráfica de las magnitudes de desplazamiento de ambas figuras.

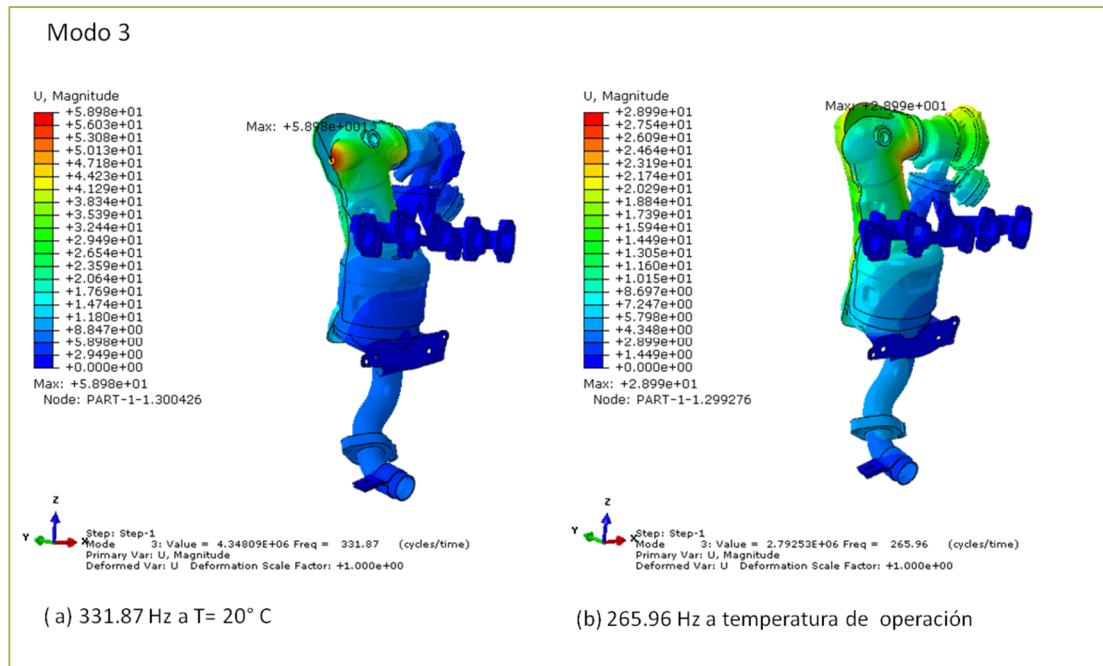


FIGURA 6.10. ANÁLISIS MODAL: MODO 3

Mientras el modo 4 alcanza una frecuencia de 342.00Hz en temperatura ambiente y de 296.52Hz en temperatura de operación (Figura 6.11). Al igual que el modo 2, hay una gran divergencia en las oscilaciones de ambos análisis. Para el caso del modo en frío, la oscilación es casi exclusiva en el escudo térmico, en tanto que el modo en caliente es de todo el sistema. Lo anterior puede deberse a los cambios en la rigidez del sistema, así como también a cambio en las propiedades de los materiales (módulo de elasticidad) causados dichos cambios por el incremento en la temperatura del sistema.

El modo 5 alcanza los 362.14Hz a temperatura ambiente, mientras que en condiciones de trabajo disminuye a 323.59Hz, representando una diferencia del 10.4% entre ambos valores de frecuencia tal como se muestra en la Figura 6.12. Ambos modos corresponden a vibraciones del escudo térmico.

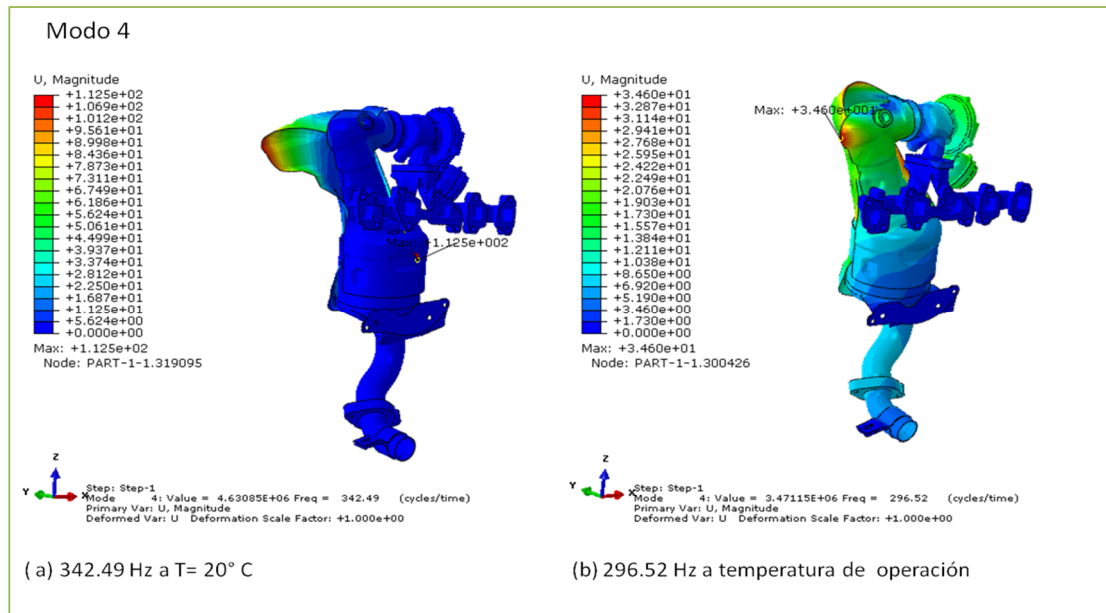


FIGURA 6.11. ANÁLISIS MODAL: MODO 4

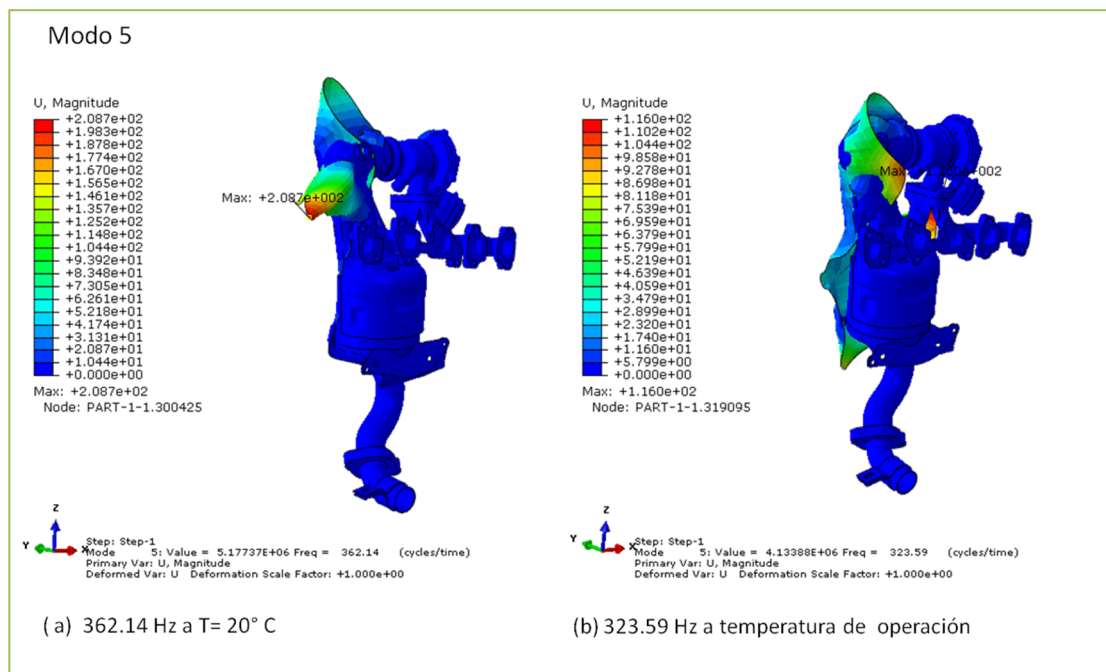


FIGURA 6.12. ANÁLISIS MODAL: MODO 5

La Figura 6.13 muestra, así como en los modos 2 y 4, el sexto modo con formas oscilantes distintas en ambos. El modo en frío, a 379.10Hz, implica movimiento en todo el sistema, en tanto que el modo caliente, a 332.59Hz, es casi exclusivo del escudo térmico.

Las Figuras 6.14, 6.15 y 6.16, muestran similitud en cuanto a las formas oscilantes de los modos 7, 8 y 9, respectivamente, tanto para los análisis en frío como en calor. En los tres casos, las vibraciones se ven maximizadas en el escudo térmico.

Para el caso del modo 7, en la Figura 6.14, las frecuencias naturales son, para el modo en frío, de 403.38Hz y para el modo en caliente, de 370.61Hz, representando una diferencia del 8% aproximadamente.

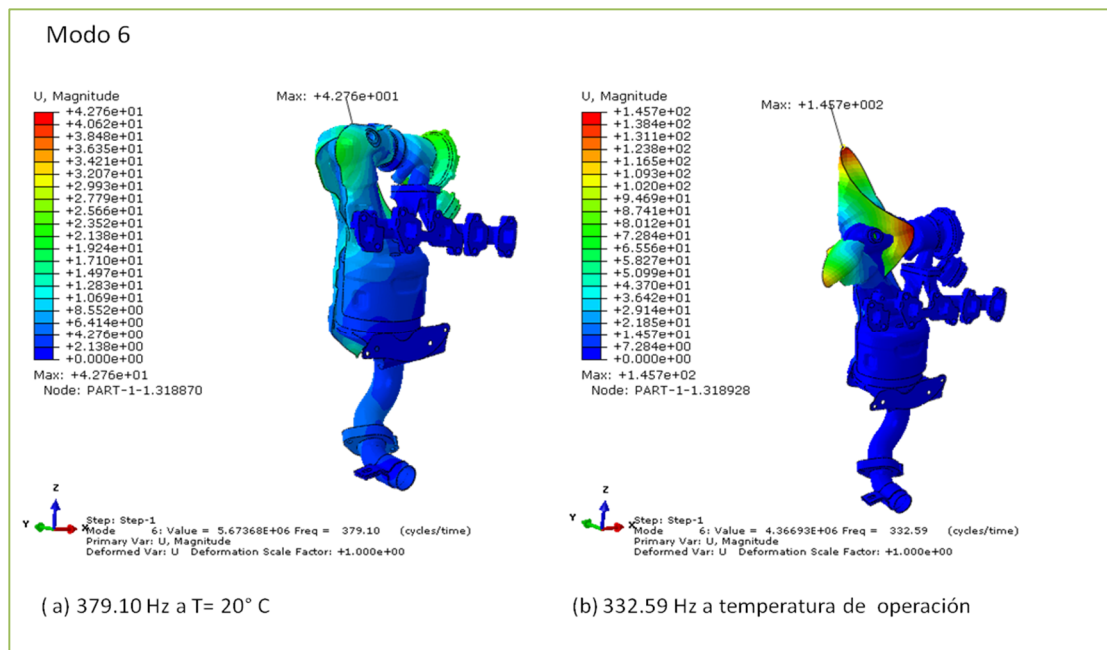


FIGURA 6.13. ANÁLISIS MODAL: MODO 6.

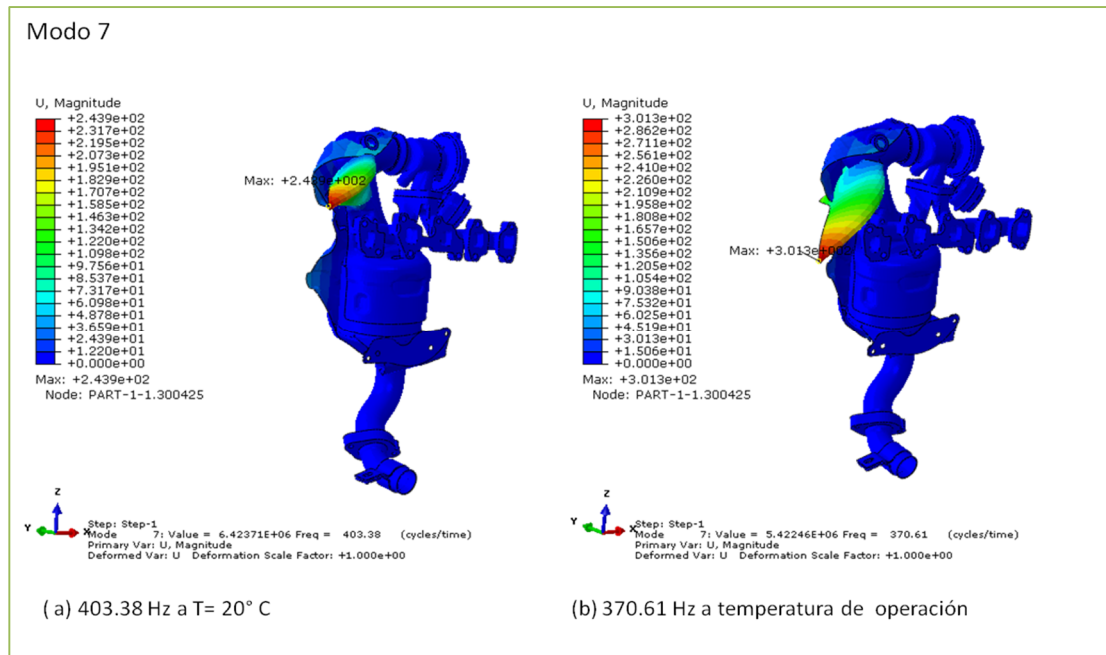


FIGURA 6.14. ANÁLISIS MODAL: MODO 7

El modo 8, presentado en la Figura 6.15, muestra los valores de frecuencia a 417.79Hz para temperatura ambiente y de 397.80Hz para temperatura de operación. A contraste del modo anterior, las oscilaciones están presentes en la parte inferior del escudo térmico.

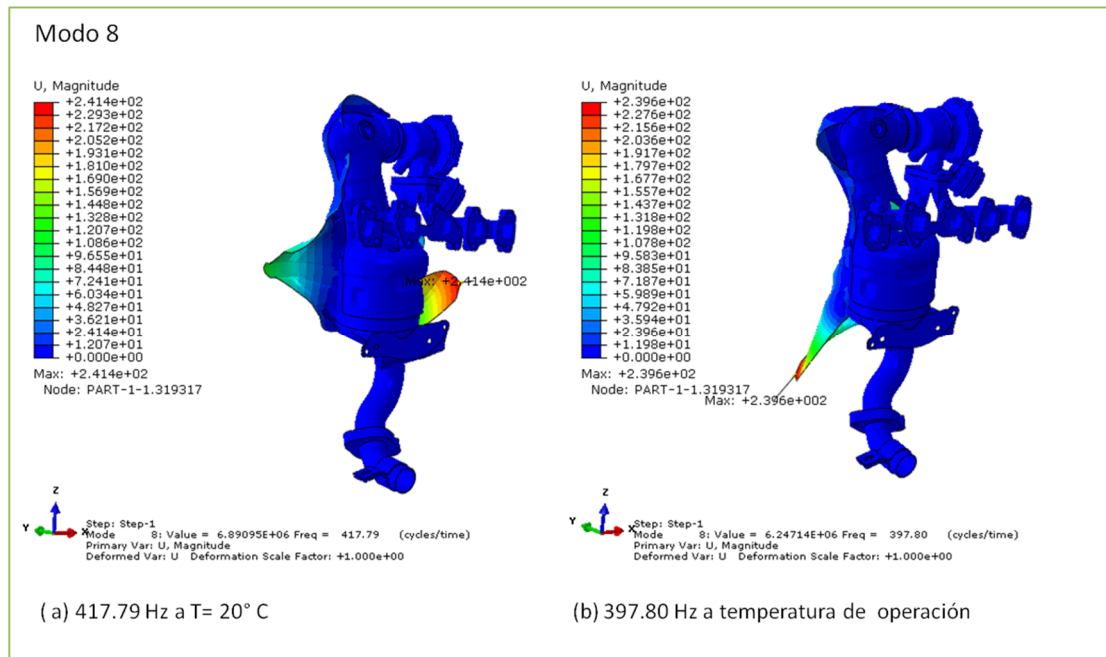


FIGURA 6.15. ANÁLISIS MODAL: MODO 8

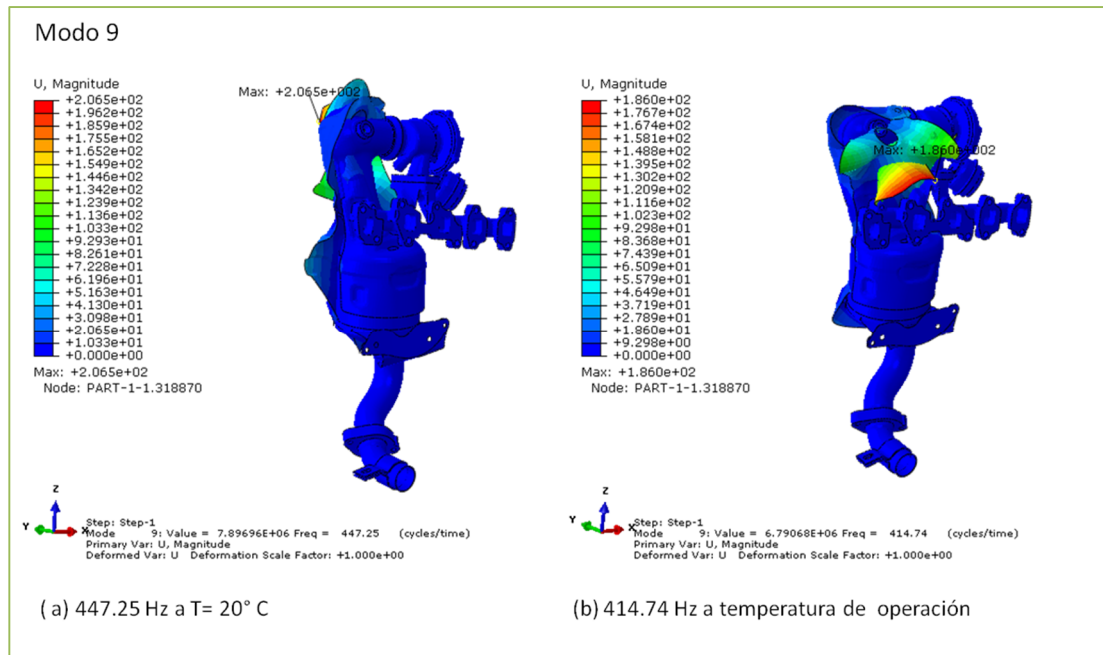


FIGURA 6.16. ANÁLISIS MODAL: MODO 9

En la Figura 6.16 se visualiza el modo 9, cuyas formas oscilantes se encuentran particularmente en la parte superior del escudo térmico (similar al modo 7). Los valores de frecuencia son de 447.25Hz y de 414.74Hz para el análisis en frío y en caliente, respectivamente.

Finalmente, en la Figura 6.17 se muestra el modo 10. Así como en los modos 2, 4 y 6, existe divergencia en las formas vibratorias para los análisis a temperatura ambiente y a temperatura de operación. Para este caso, la frecuencia en frío es de 478.80Hz, y la frecuencia en caliente es de 450.97Hz, es decir, aproximadamente un 5% de diferencia entre ambos valores. Aunque dicha diferencia no es representativa a contraste de los modos anteriores, en el caso del modo a temperatura ambiente, cabe destacar que los desplazamientos se realizan casi enteramente en el escudo térmico. No obstante, el modo a temperatura de operación tiende a afectar la parte superior del escudo térmico, así como el tubo de salida.

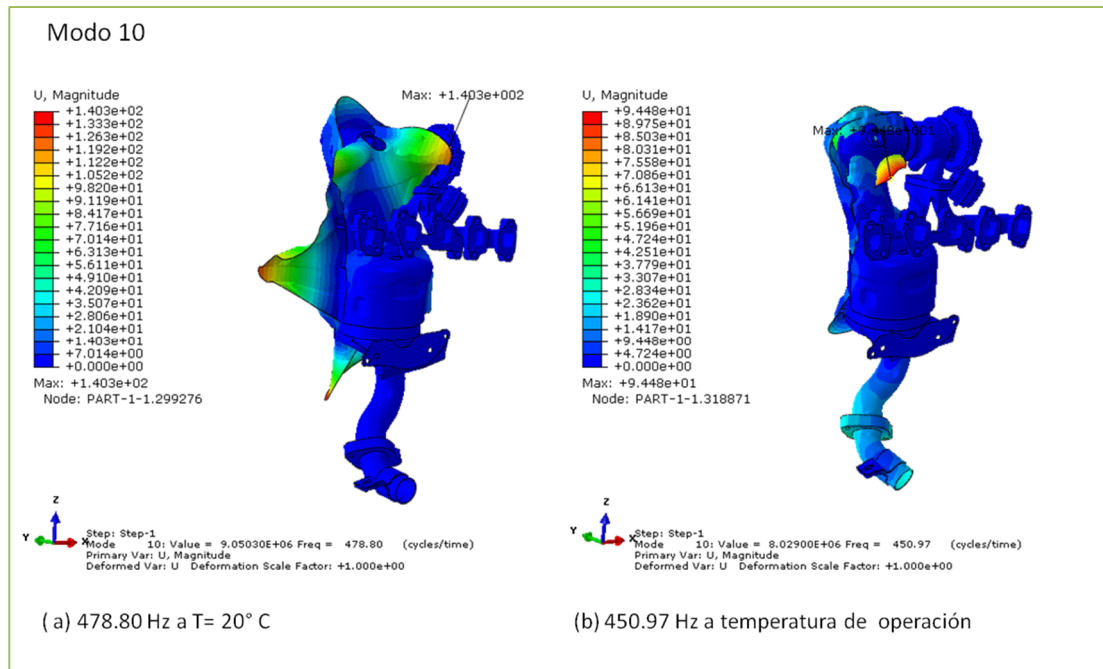


FIGURA 6.17. ANÁLISIS MODAL: MODO 10

En general los resultados obtenidos se comportan de manera esperada siendo siempre el valor de la frecuencia en frio mayor al modo correspondiente en el modal a temperatura de operación, lo anterior se debe a las altas temperaturas de operación las cuales modifican las propiedades del material. Una de las propiedades que se ve afectada por este incremento en la temperatura es la rigidez del sistema, por lo cual es de esperarse que disminuyan las frecuencias de vibración, aunado a esto puede provocar cambios en el valor del desplazamiento en algunas zonas lo cual puede verse influido por zonas donde existe una concentración de temperaturas, lo anterior dependerá intrínsecamente de las condiciones frontera y las geometrías del sistema, por otro lado comparando los resultados obtenidos por la simulación modal son comparadas con las obtenidas en la prueba experimental. Ambos resultados se muestran en la Tabla 6.1.

6.4 Correlación

Con el fin de validar las simulaciones del modelo del sistema de escape, se ejecutaron un conjunto de pruebas físicas para determinar frecuencias naturales y para determinar las temperaturas de operación del sistema.

Una vez que se manufacturó el prototipo del sistema de escape en cuestión, éste se sometió a dos pruebas. La primera consistió en aplicar una serie de oscilaciones al sistema, y por medio de acelerómetros, determinar las frecuencias resonantes. Posteriormente, el sistema se conectó a un banco de pruebas automotrices, donde se le haría circular gas caliente en condiciones operativas. Una serie de termopares determinan las temperaturas en distintas zonas del modelo.

6.4.1. Prueba de oscilaciones resonantes

Para poder llevar a cabo esta prueba física, fue necesario el uso de un sistema tipo vibrador (shaker), mostrado en la Figura 6.18.



FIGURA 6.18. MUESTRA DEL SISTEMA SHAKER PARA LA PRUEBA DE RESONANCIA FÍSICA

La prueba consistió en asegurar completamente el sistema de escape por las bridas de entrada y de salida, así como de la carcasa. Posteriormente, en cuatro posiciones del escudo térmico se fijaron acelerómetros. Lo anterior con la finalidad de medir la aceleración lineal y, desde luego, el desplazamiento instantáneo del sistema cuando es sometido a las vibraciones (como se aprecia en la Figura 6.19).

Dado que en las simulaciones, la mayor parte de los modos se vieron maximizados en el escudo térmico, se decidió medir solamente las aceleraciones lineales en dicho componente. Naturalmente, esto implica que únicamente los primeros modos serán de interés para la correlación de las pruebas físicas con las computacionales ya que los primeros modos son los que pueden entrar en resonancia con el motor del automóvil [82].



FIGURA 6.19. POSICIÓN DE LOS CUATRO ACCELERÓMETROS USADOS PARA LA PRUEBA VIBRATORIA

El perfil de frecuencias aplicado consistió en un barrido de 25Hz a 500Hz, durante 100 horas consecutivas (Figura 6.20). Las vibraciones se aplicaron en modo sinusoidal.

Para el caso de este sistema de escape, el motor al cual se diseña tiene una velocidad de rotación máxima de 4200RPM, por lo que el criterio de aceptación es de una frecuencia superior a 189Hz.

Una vez que el sistema se puso en marcha, la prueba se ejecutó y al final, los datos de los cuatro acelerómetros se presentaron en una gráfica como se presenta en la Figura 6.21. El resumen de resultados se muestra en la Tabla 6.1, donde se comparan los valores de la prueba física y de las simulaciones.

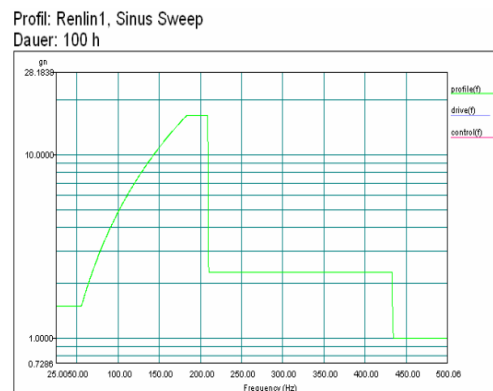


FIGURA 6.20. PERFIL DE ACELERACIÓN APLICADO AL SISTEMA

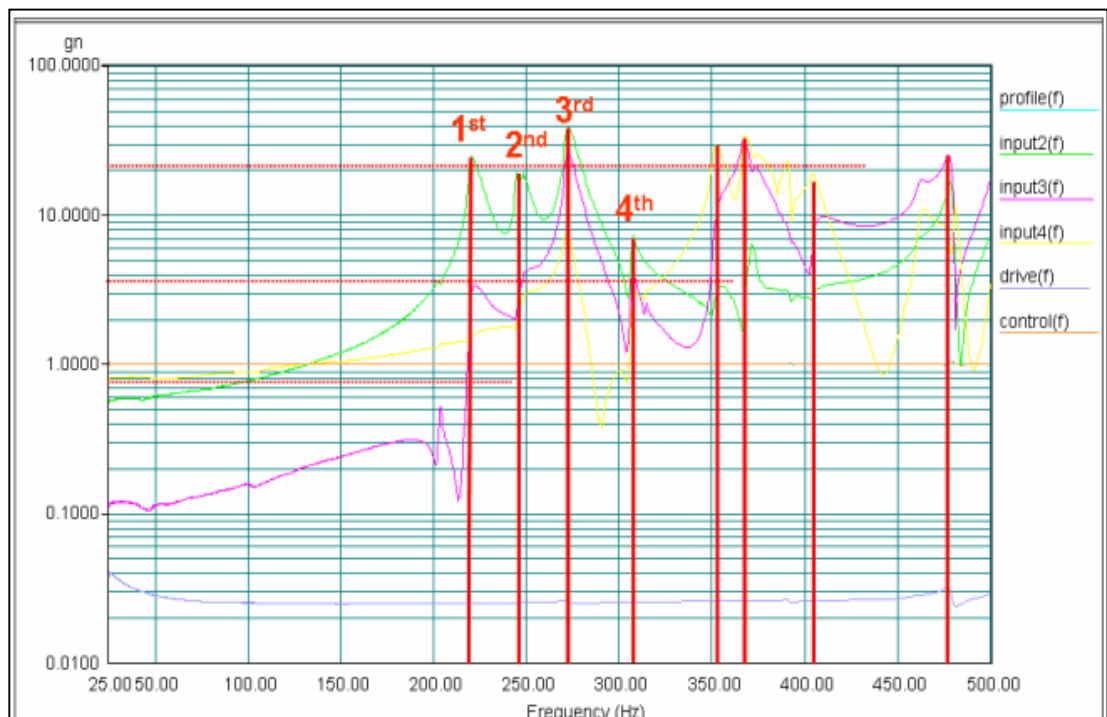


FIGURA 6.21. ACELERACIONES Y FRECUENCIAS RESONANTES DEL ESCUDO TÉRMICO

TABLA 6.1. SE MUESTRAN LA COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y FÍSICOS

<i>Modo #</i>	<i>Resultados Simulación [Hz]</i>	<i>Resultados Físicos [Hz]</i>
1	194	219
2	252	250
3	266	268
4	297	310

Como se aprecia en la Tabla 6.1. Los valores de los primeros cuatro modos son similares en las pruebas físicas, y las pruebas de simulación, teniendo una discrepancia de tan solo el 3% entre las cifras. Dado que los primeros modos, acorde a las simulaciones ejecutadas previamente, muestran que el escudo térmico era la parte que más sufría desplazamientos, estos datos nos permiten concluir que las simulaciones tienen un alto grado de certidumbre para mejorar y optimizar un diseño sin que pase por las pruebas físicas. Así mismo, permite también concluir que la región lineal del comportamiento de los materiales es caracterización suficiente para las pruebas de resonancia.

6.4.2. Prueba térmica

Con la finalidad de continuar con las pruebas de validaciones, se ejecutó un montaje en un banco de pruebas al sistema de escape para hacerle fluir gas caliente a la temperatura de operación, con el fin de evaluar las temperaturas máximas que alcanza el sistema en distintas zonas.

Para ello, se montó el sistema en un banco consistente en un a motor diésel, como el mostrado en la Figura 6.22.

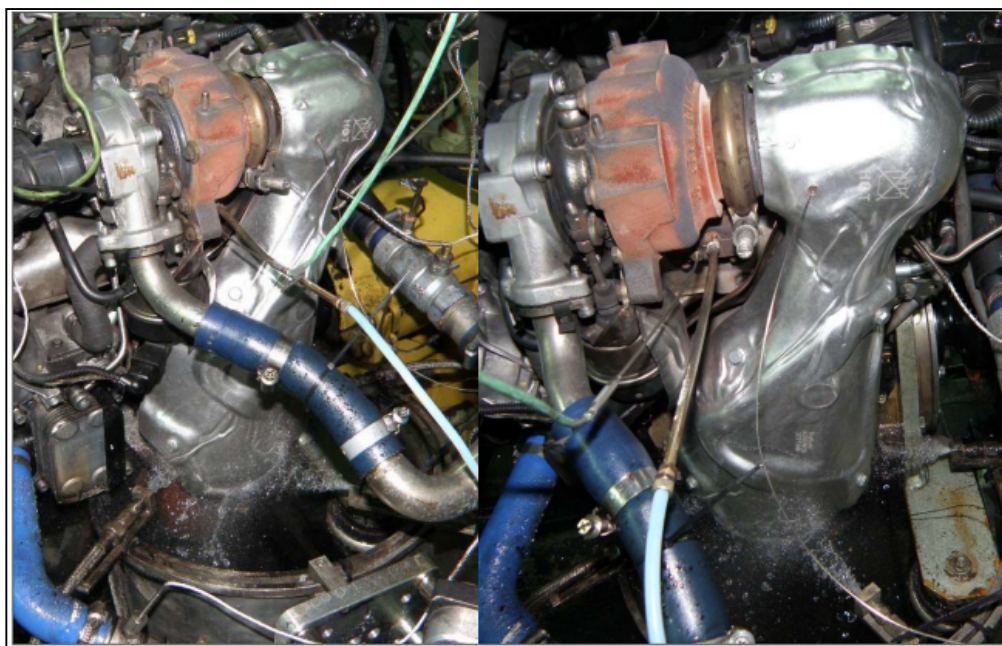


FIGURA 6.22. BANCO PARA PRUEBAS TÉRMICAS. EL CHORRO DE AGUA SE UTILIZÓ PARA PRUEBAS DE CHOQUE TÉRMICO, LAS CUALES NO SE DESCRIBEN EN ESTE CAPÍTULO.

Las mediciones se hicieron a lo largo y ancho del sistema, en 20 posiciones distintas (como se muestran en la Figura 6.23), usando termopares en los distintos componentes, excepto en el escudo térmico, donde por dificultades técnicas, no pudo ser colocado. Para poder sortear el problema, se aplicó un tipo de soldadura aluminizada, la cual desafortunadamente produjo lecturas incorrectas en algunos termopares, los cuales fueron descartados en los resultados, ya que es muy frágil.

La prueba completa consistió en aplicar de forma cíclica el flujo de aire caliente a temperaturas operativas, con el fin de observar esfuerzos residuales por la expansión/contracción térmica, así como la aplicación de un chorro de agua simulando condiciones de lluvia, como un shock térmico. No obstante, el enfoque de este trabajo se limita a determinar la temperatura máxima en las partes del sistema de escape.

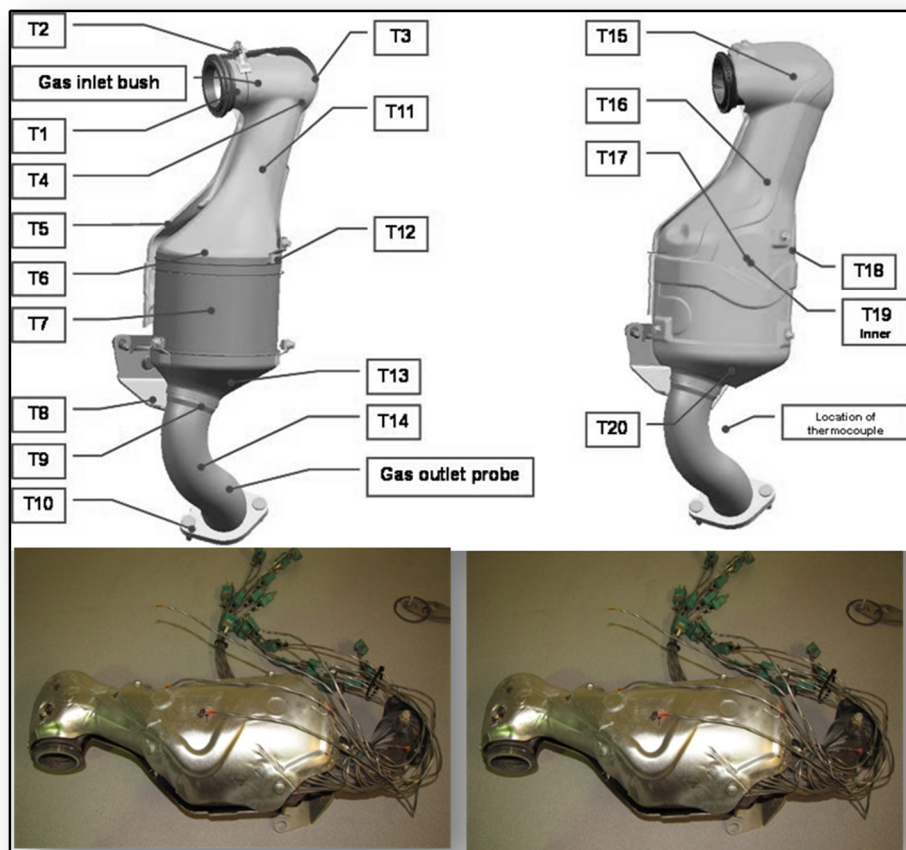


FIGURA 6.23. ZONAS DE TERMOPARES PARA LA PRUEBA TÉRMICA

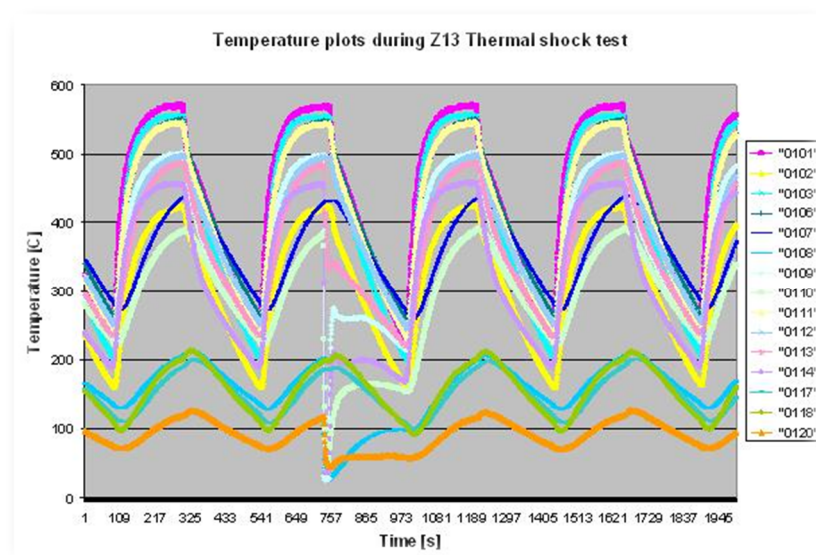


FIGURA 6.24. GRÁFICA DE TEMPERATURAS EN LAS ZONAS DEL SISTEMA DE ESCAPE. LA BARRA ROJA REPRESENTA LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS DE INTERÉS PARA LA PRUEBA TÉRMICA.

La Figura 6.24, muestra las temperaturas en 15 de las 20 zonas del sistema de escape. El escudo térmico frontal, acorde a los termopares que lograron dar lecturas fiables, muestran variaciones de temperatura entre los 230°C a los 270°C, coincidente con los 240 – 300°C que muestran las simulaciones térmicas. Las temperaturas mostradas en los conos de entrada y de salida rondan los 580°C en las pruebas físicas, lo cual se aproxima a los 520 – 550°C que las simulaciones muestran. Finalmente, la carcasa del convertidor muestra en la prueba física una temperatura de 440°C, a contraste del rango de temperaturas que la simulación arroja, que es de 400 – 430°C. La Tabla 6.2 muestra el resumen de los valores obtenidos durante las simulaciones y las pruebas experimentales.

TABLA 6.2 SE MUESTRAN LA COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS MEDIANTE LA SIMULACIÓN Y LAS PRUEBAS FÍSICAS.

<i>Componente</i>	<i>Resultados Simulación [°C]</i>	<i>Resultados Físicos [°C]</i>
Escudo Térmico	240-300	230-270
Carcasa	400-430	430-450
Tubo de Salida	485-510	495-520
Conos	520-550	540-580

Los análisis térmicos en los sistemas de escape son de suma importancia para optimizar espesores en materiales aislantes de calor o escudos térmicos debido a su elevado costo. El poder disminuir el espesor de estos componentes representa un gran ahorro para las compañías manufactureras de sistemas de escape, sin descuidar los factores de calidad y de confort de los pasajeros.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

7.1 Conclusiones

A través de la selección de materiales, acorde a los criterios citados en capítulos anteriores, y con una simple caracterización de los mismos en su región lineal, se puede concluir que dichas condiciones son suficientes para aproximar con un alto grado de fiabilidad las simulaciones utilizando el análisis del elemento finito con las pruebas térmicas.

Las simulaciones de los modos resonantes muestran las distintas oscilaciones, así como los desplazamientos máximos de las distintas partes del sistema de escape. Dichas simulaciones se asemejan en gran medida a las pruebas físicas (incluso de forma simplificada puesto que solamente se midió el escudo térmico), con lo cual, hay evidencia que las simulaciones modales poseen un alto grado de certidumbre durante el análisis y la optimización de los modelos de sistemas de escape.

Para el caso de las simulaciones térmicas, con el puro conocimiento de la conductividad térmica de cada material, fue posible ejecutar una simulación que se aproxima de forma notoria a las pruebas físicas. Una de las particularidades que se observan durante la comparativa de resultados es que, el escudo térmico fue simulado a temperatura ligeramente menor que la obtenida en la prueba térmica, y no obstante, las temperaturas en los conos y la carcasa se obtuvo un poco mayor que la observada en la prueba térmica. Esto puede deberse a que las condiciones circundantes al sistema no son iguales. En cualquier caso, la variación que existe es mínima y se vuelven las

simulaciones térmicas fiables para la mejora y optimización de sistemas de escape.

Se demuestra que con el conocimiento necesario y determinando las condiciones frontera críticas el sistema puede ser modelado, evitando a su mínimo el ejercicio de prueba y error. Más aún, la información obtenida puede utilizarse como base para la optimización del diseño de componentes. Lo cual, a la larga, resulta en reducción de costos, así como la independencia tecnológica al generar el conocimiento necesario para el desarrollo de nuevos diseños.

La importancia de la modelación numérica queda una vez plasmada dentro de este trabajo, debido a que se logró validar y sustentar los resultados obtenidos por el MEF, cumpliendo así con la hipótesis y los objetivos planteados en los primeros capítulos de este trabajo.

7.2 Trabajo a Futuro

Debido a que la industria de sistemas de escape comporta de manera muy acelerada, requiriendo cada vez desarrollar mejores sistemas de escape y asegurando el correcto funcionamiento de los mismos, para así buscar sistemas con mayor eficiencia logrando reducir los contaminantes en los gases expelidos por el motor de combustión interna y de esta manera cumplir con los estándares de calidad y normas ambientales.

Por lo anterior es de suma importancia lograr reducir costos y tiempos durante el desarrollo del producto, por lo que realizar de manera satisfactoria simulaciones utilizando el Método de Elemento Finito, se convierte en un tema muy importante para dichos ahorros.

En éste proyecto se realizó la validación de dos tipo de análisis los cuales se utilizan para validar un sistema durante su desarrollo (térmico y Modal), sin

embargo existen otros tipos de pruebas físicas que se llevan a cabo durante el desarrollo y la validación del diseño, siguiendo esta misma línea de validación de análisis para reducir las pruebas físicas, es importante continuar con la validación de otras pruebas como por ejemplo análisis de rigidez dinámica, flexión en conos a temperatura ambiente y de operación, análisis termo-mecánico (ciclos térmicos), implementación de análisis de los diferentes tipos de fatiga que se pueden presentar en un sistema de escape, entre otros. Logrando de esta manera tener una herramienta eficaz y confiable para reducir los costos de las pruebas físicas logrando reducir las mismas.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de escape completo de un automóvil.	10
Figura 2.2. Desarrollo del uso de los convertidores catalíticos a través de los años .	11
Figura 2.3. Elementos del convertidor catalítico de un motor a gasolina diseñado por katcon luxemburgo.	13
Figura 2.4. Representación del proceso de conversión catalítica en motores a gasolina.	19
Figura 2.5. Componentes de un convertidor catalítico de un motor a diésel con el sistema SCR integrado.	28
Figura 2.6. Representación de la recirculación de los gases de escape hacia la entrada del múltiple de admisión.	28
Figura 3.1. Colector de escape de hierro fundido para motor de cuatro cilindros .	34
Figura 3.2. Filtro de partículas diésel SiC.	37
Figura 3.3. Interam 100 preparado para ser ensamblado en el convertidor catalítico .	40
Figura 4.1. Historia del método de elemento finito.	47
Figura 4.2. Ejemplo de mallado empleando el MDF y el MEF.	48
Figura 4.3. Placa con cuatro nodos representada en un conjunto de resorte.	50

Figura 4.4. Aplicaciones para el método de aproximación directa.	54
Figura 4.5. Esquema del cálculo del factor de forma.	65
Figura 4.6. Análisis realizados a componentes automotrices por medio del MEF.	76
Figura 5.1. Metodología y paquetes computaciones empleados para las simulaciones.	79
Figura 5.2. Geometría de un convertidor catalítico diseñado por katcon Luxemburgo.	80
Figura 5.3. Comparación entre geometría original y reparada. a) Muestra la presencia de líneas que afectan el mallado. b) Representa el cono reparado con las técnicas de limpieza de geometría para ser mallado.	81
Figura 5.4. Diferentes tipos de elementos en 2 y 3 dimensiones.	82
Figura 5.5. Ejemplo de tamaño de elemento. a) Discretización con 41 elementos. b) Discretización con 192 elementos.	83
Figura 5.6. Discretización completa del convertidor catalítico.	84
Figura 5.7. Componentes mallados. a) Elementos hexaédricos y tetraédricos. b) Elementos 2D (shells). c) Elementos tetraédricos.	85
Figura 5.8. Unión por medio de equivalencia entre convertidor catalítico y aislante térmico. a) vista completa. b) sección transversal.	86
Figura 5.9. Soldadura entre los componentes carcasa (gris) y cono (amarillo). a) Componentes sin soldadura donde no hay unión entre ellos. b) Soldadura (elementos en color rojo) en el espacio vacío entre carcasa y cono.	87

Figura 5.10. Contacto Tie. a) Tie generado entre el soporte, tubo de salida y cono de salida. b) Superficie "maestra" en el soporte. c) Superficie "esclava" en el tubo de salida.	88
Figura 5.11. Representación del orden que debe tener las condiciones frontera al pasar la base de datos de fluidos dinámicos a elemento finito.	91
Figura 5.12. Resultados del análisis de CFD, la figura muestra (izq) valores de los coeficientes de transferencia de calor $W/m^2 K$ y (der) temperatura $^{\circ}F$ utilizados como condiciones de frontera para el análisis térmico.	92
Figura 5.13. Condiciones frontera. La figura indica las áreas donde existe restricción para los 6 grados de libertad del sistema.	94
Figura 6.1. Resultados del análisis térmico del Sistema de Escape Completo.	96
Figura 6.2. Análisis térmico del Sistema de Escape sin Escudo Térmico.	97
Figura 6.3. Análisis térmico del Escudo Térmico.	98
Figura 6.4. Análisis térmico del Tubo y brida de Entrada.	99
Figura 6.5. Análisis térmico del Múltiple de Escape y Turbocompresor.	100
Figura 6.6. Análisis térmico de Carcasa, Tubo de Salida y Soportes.	101
Figura 6.7. Resultados de las frecuencias naturales en frío y en caliente.	103
Figura 6.8. Análisis modal: Modo 1.	104
Figura 6.9. Análisis modal: Modo 2.	104
Figura 6.10. Análisis modal: Modo 3.	105
Figura 6.11. Análisis modal: Modo 4.	106

Figura 6.12. Análisis modal: Modo 5.	106
Figura 6.13. Análisis modal: Modo 6.	107
Figura 6.14. Análisis modal: Modo 7.	108
Figura 6.15. Análisis modal: Modo 8.	108
Figura 6.16. Análisis modal: Modo 9.	109
Figura 6.17. Análisis modal: Modo 10.	110
Figura 6.18. Muestra del sistema shaker para la prueba de resonancia física.	111
Figura 6.19. Posición de los cuatro acelerómetros usados para la prueba vibratoria.	112
Figura 6.20. Perfil de aceleración aplicado al sistema.	113
Figura 6.21. Aceleraciones y frecuencias resonantes del escudo térmico.	113
Figura 6.22. Banco para pruebas térmicas. El chorro de agua se utilizó para pruebas de choque térmico, las cuales no se describen en este capítulo.	115
Figura 6.23. Zonas de termopares para la prueba térmica.	116
Figura 6.24. Gráfica de temperaturas en las zonas del sistema de escape. La barra roja representa las temperaturas máximas de interés para la prueba térmica.	116

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1. Beneficios de utilizar el convertidor catalítico y filtro de partículas.	26
Tabla 3.1. Composición química de los aceros inoxidables AISI 409 Y 441.	32
Tabla 3.2. Algunas propiedades de los aceros inoxidables AISI 409 Y AISI 441.	33
Tabla 3.3. Propiedades del hierro fundido empleado en colectores de escape.	34
Tabla 3.4. Composición química del acero AISI 1008.	35
Tabla 3.5. Propiedades del acero al carbón AISI 1008.	35
Tabla 3.6. Se muestra la composición química y algunas propiedades del aislante Interam 100.	40
Tabla 3.7. Propiedades de panales de cordierita.	41
Tabla 4.1. Aproximación utilizada y analogía con otros análisis.	52
Tabla 5.1. Elementos empleados para los análisis.	82
Tabla 5.2. Sintaxis de los elementos.	83
Tabla 5.3. Propiedades térmicas de los materiales empleados.	89
Tabla 5.4. Interacciones por convección declaradas para el análisis térmico.	90
Tabla 5.5. Interacciones por radiación declaradas en el análisis térmico.	90

Tabla 5.6. Propiedades críticas para análisis modal._____93

Tabla 6.1. Se muestran la comparación de resultados de simulación y físicos._____114

Tabla 6.2 Se muestran la comparación de temperaturas mediante la simulación y las pruebas físicas._____117

REFERENCIAS

- [1] R. F. Ronald Heck, «Automobile exhaust catalyst,» *Applied Catalysis A*, pp. 443-457, 2001.
- [2] R. Shah, «Automotive air pollution and its control by catalytic convertes,» 2013.
- [3] A. T. A.P.E. York, «Cleaner Vehicle Emissions,» de *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2010.
- [4] J. Kašpar, Automotive catalytic converters: current status and some perspectives, vol. 77, pag.419-449,Elsevier, 2003.
- [5] C. Bohme, «The Success of the Automotive Catalytic Converter,» BASF Chemical Company, 2007.
- [6] W. W. Pulkrabek, Engineering fundamentals of the internal combustion engine., 2 ed., Prentice Hall, 2004.
- [7] G. A. B. H. Barry Cooper, «Platinum Matthey,» 2004.
- [8] M. S. O. Valencia, «Simulación de un convertidor catalítico automotor.,» 2005.
- [9] C. H. a. D. W. G. Emrah Ozensoy, «Understanding the catalitic conversion of automobile exhaust emissions using model catalysts: CO + NO reaction on Pd (111),» *Topics in catalysis*, vol. 28, nº 1-4, 2004.
- [10] A. K. G. P. Argun Yetkin, «Experimental evaluation of DOC light-off behavior using secondary fuel injection.,» de *SAE 2009 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition*, 2009.

- [11] I. M. Thomas Bollerhoff, «Filtration and regeneration modeling for particulate filters with inhomogeneous wall structure,» *Catalysis today* , pp. 24-31, 2012.
- [12] T. C. M. R. R. Watlinga, «Development, validation and application of a model for an SCR catalyst coated diesel particulate filter,» vol. 181, n° 1, pp. 32-41, 2012.
- [13] G. A. a. B. Harrison, «The development of catalysts for emission control from motor vehicles: early research at johnson matthey,» de *Topics in catalysis*, vol. vol.28, N. Kruse y G. Somorjai, Edits., 2004.
- [14] W. S. P. a. M. J. L. Jung Min Seo, «The Best Choice of Gasoline/Diesel Particulate Filter,» 2012.
- [15] R. H. a. A. H. Amundsen, «Exhaust emissions from vehicles with Euro 6/VI technology,» 2013.
- [16] P. R. B. I. F. W. V. Robert Cloudt, «SCR-only Concept for Heavy-duty Euro VI Applications,» 2009.
- [17] «CUMMINS-TURBO-TECHNOLOGIES,» (2004).
- [18] «CUMMINS-TURBO-TECHNOLOGIES,» (2007).
- [19] S. Zidat, «Exhaust hot end flow thermal management.,» 2009.
- [20] S. M. Masahiko Takeuch, «NOx storage-reduction catalysts for gasoline engines,» *Topics in catalysis*, vol. 28, p. 471, 2004.
- [21] B. Reinhard, «Sources of palladium emissions,» de *Palladium emissions in the enviroment. Analytical methods, enviromental assessment and health effects*, Springer, pag. 3-20, 2005.
- [22] Y. A. Cengel, transferencia de Calor Segunda Edicion, 2004.

- [23] Saïd Zidat, Michael Parmentier at Technical Center Luxembourg., «Heat insulation methods for manifold mounted converters,» 2000.
- [24] D. P. D. Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor, 1999.
- [25] S. K. Dwivedy, «INTRODUCTION TO VIBRATION AND STABILITY ANALYSIS OF MECHANICAL SYSTEMS,» 2000.
- [26] B. Z. Henrik Ekholm, *Modal analysis on an exhaust manifold to define a catalyst fe-model. x*, 2008.
- [27] P. Guillaume, «MODAL ANALYSIS,» Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit Brussel.
- [28] A. Bilošová, «MODAL TESTING,» 2011.
- [29] H. D. S. K. A. J. H. J.W.Lee, «Effect of various L PG systems in air supply systems on exhaust particle emission in spark-ignited combustion engine.,» *International journey of automotive Technology*, n° 6, pp. 793-800, 2010.
- [30] DELPHI, «World emissions standards heavy duty and off highway vehicles,» 2013.
- [31] TENNECO, «Hyundai diesel proceedings,» seoul, 2012.
- [32] N. A. M. a. S. M. António Marques and Eliseu Monteiro, «NOx Emissions Reduction in a Biodiesel Engine by Means of EGR Technology,» de *Fuels & Emissions Conference*, 2007.
- [33] BASF, «Hyundai disel proceedings,» seoul, 2012.
- [34] T. S. T. A. Y. S. K. Y. H. Yoshitaka Ito, «Advanced Ceramic Wall Flow Filter for Reduction of Particulate Number Emission of Direct Injection Gasoline Engines,» sae international, 2013.

- [35] J. K. R. B. Tak W. Chan and Eric Meloche, «Evaluation of a Gasoline Particulate Filter to Reduce Particle Emissions from a Gasoline Direct Injection Vehicle,» sae international, 2012.
- [36] P. L. Mangonon, The principles of materials selection for engineering desing.
- [37] D. R. Askelan, Ciencia e ingeniería de los materiales, 1998.
- [38] M. S. a. E. A. Introduction, W. Callister, Septima Edición ed., 2007.
- [39] M. A. M. N. K. T. Y. Uematsu, «Effect of temperature on high cycle fatigue behaviour in 18Cr-2Mo ferritic stainless steel,» *International Journal of fatigue*, 2007.
- [40] F. A. M. A. G. Aggen, ASM Handbook Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, vol. 3, 2005.
- [41] N. G. B. Carter, Ceramic Materials Science and Engineering, Springer, 2007.
- [42] c. oliveiraa, «Mechanical and thermal behavior of cordierite-zirconia composites,» 2001.
- [43] S. Mazumdar, Composites Manufacturing: Materials, Products and Process Engineering, CRC PRESS, 2001.
- [44] G. Milton, Theory of composites, Cambridge.
- [45] L. ,. a. S. C. AGuarino, «The cooperative effect of load and disorder in thermally activated rupture of a 2d random fuse network,» *Journal of Statistical Mechanics*., 2006.
- [46] P. Bardhan, «Ceramic honeycomb filters and catalysts.,» 1997.

- [47] J. Reddy, An introduction to the finite element method, McGraw Hill, 1993.
- [48] P. W. C.F. Gerald, «Applied numerical analysis,» de *Applied numerical analysis*, Pearson, 2004.
- [49] G. L. y. S. S. Quek, «The finite element method».
- [50] O. Z. y. R. Taylor, The finite element method, Vol. 1: The basis, Butterworth, 2000.
- [51] H. David, Fundamentals of finite element analysis, McGraw Hill, 2004.
- [52] J. Heinbockel, Introduction to tensor calculus and continuum mechanics, Trafford Publishing, 2001.
- [53] R. Clough, «The finite element method after twenty-five years,» de *Computers and Structures Vol. 12*, pag 361-370, 1980.
- [54] P. T. y. T. Damian, Basics of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics, Petrilă T. y T. Damian, Springer, 2005.
- [55] A. Aye, 083FEA12JN-B20DTR-Module4, Luxemburgo, 2014.
- [56] A. 6.13., Abaqus Documentation 6.13, 2013.
- [57] E. T. y. T. B. K.H. Huebner, The finite element method for engineers, Wiley, 1995.
- [58] R. y. P. Blevins, «Formulas for natural frequency and model shape,» *Journal applied mechanics*, vol. 47, 1980.
- [59] J. H. Wilkinson, The Algebraic Eigenvalue Problem, Oxford: Oxford University Press, 1965.

- [60] ABAQUS, Theory Guide (6.13), Providence, RI, USA: Dassault Systèmes, 2013.
- [61] B. N. Parlett, The Symmetric Eigenvalue Problem, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1980.
- [62] R. G. Grimes, J. G. Lewis y H. D. Simon, «A Shifted Block Lanczos Algorithm for Solving Sparse Symmetric Generalized Eigenproblems,» *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, vol. 15, pp. 228-272, 1994.
- [63] C. C. Paige, B. N. Parlett y H. A. van der Vorst, «Approximate solutions and eigenvalue bounds from Krylov subspaces,» *Numerical Linear Algebra with Applications*, pp. 115-133, 1995.
- [64] Y. A. Cengel y M. A. Boles, Thermodynamics: an engineering approach Vol. 5, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [65] A. E. Green y P. M. Naghdi, «A general theory of an elastic-plastic continuum,» *Archive for rational mechanics and analysis* 18.4, pp. 251-281, 1965.
- [66] G. Casati, «Energy transport and the Fourier heat law in classical systems,» *Foundations of Physics* 16.1, pp. 51-61, 1986.
- [67] J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, 1990.
- [68] R. Siegel y J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [69] C. C. Yu y J. C. Heinrich, «Petrov-Galerkin Method for Multidimensional, Time-Dependent, Convective-Diffusive Equations,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, pp. 2201-2215, 1987.

- [70] S. Robinson, «Simulation: The practice of model development and use,» Wiley, 2004.
- [71] C. Chung, « Simulation modeling handbook: a practical approach,» CRC press, 2003.
- [72] Z. L. Zou Bin, «The Impact of temperature effect on exhaust manifold thermal modal analysis,» china, 2013.
- [73] M. G. Sr. Rajadual, «Non-linear Thermal modal analysis for hot end exhaust system,» india, 2014.
- [74] Rajadurai, «Modal analysis for exhaust manifold in hot conditions, is there need?,» india, 2014.
- [75] S. KM, *SAES0309-2013-07-14-CSS_L3V_Beta_Catalytic_Converter-New-Design_not_fixed_vs_top_bkts_4mm_vs_all_bkt_4mm*, 2014.
- [76] A. M. Akihito Hosoi, «Thermal Analysis of the Exhaust Line Focused on the Cool-Down,» 2014.
- [77] Abaqus/CAE, «Training 2009/2010. University of Birmingham Intranet,» 3 abril 2013. [En línea]. Available: <https://intranet.birmingham.ac.uk/collaboration/hpc-research/documents/public/fem/3-Preprocessing-of-ABAQUS-CAE.pdf>.
- [78] Abaqus/CAE, «FE Post-processing,» 3 abril 2013. [En línea]. Available: <http://www.ce.jhu.edu/SSGM/tools/AbaqusPostProc.pdf>.
- [79] H. 2011, «Hyperworks Altair,» 18 mayo 2013. [En línea]. Available: http://ol.cadfamily.com/hyperworks10/help/hm/hmbat.thm?element_quality_calculation_hypermesh.htm hypermesh library o librería hypermesh.

- [80] A. P. S. K. K. a. U. G. Swapnil D Vyas, «Multi-physics simulation of 6-cylinder dieselengine exhaust manifold for investigation of thermo mechanical stresses,» 2015.
- [81] M. A. M. G. Nestor Martinez, «Modeling the vibrations in a catalytic converter for diesel engine.,» de *SIMULIA Customer Conference*, 2011.
- [82] A. Andreas, «training of FEA for engineers,» Luxemburgo, 2012.
- [83] H. J. F. O. MIYAZAKI Atsushi, «Ferritic Stainless Steel for Automotive Exhaust Systems-High Heat-Resistant Ferritic Stainless Steel with High Formability for Automotive Exhaust Manifolds.2004».
- [84] C. D. M. P. K. P. K. O. Rathindra Nath Das, «Evaluation of thermal shock resistance of cordierite honeycombs,» *Bull Matter*, vol. 25, n° 2, pp. 127-132, 04 2002.
- [85] O. D. Makinde, «Modelling the Thermal Operation in a Catalytic Converter of an Automobile's Exhaust,» n° 1, pp. 51-61, 2008.
- [86] H. R. Jüri Lavrentjev, «Acoustic analysis fo small engine catalitic converters,» p. 0022, 28 09 2010.
- [87] M. S, «Catalyst, recent advances in automobile exhaust,» de *Catalysis surveys from japan*, vol. 1, pag. 111-117, 1997.
- [88] S. M. Masahiko Takeuchi, «NO_x storage- reduction catalysts for gasoline engines,» de *Topics in catalysis*, vol. 28, SpringerLink, pag. 151-156, 2004.
- [89] F. Yousif, *The Design of an Exhaust Sampling System for the, Ontario: University of Windsor*, 2010.
- [90] J. L. S. F. Magdi Khair, «Achieving Heavy-Duty Diesel NO_x/PM Levels Below the EPA 2002 Standards--An Integrated Solution,»

SAE, Detroit, 2000.

- [91] T. M. S. G. Koichi Kinoshita, «Study on removal of PM and NO_x in diesel exhaust by Using DC corona discharge,» Detroit, 2000.
- [92] M. P. Saïd Zidat, «Exhaust Manifold Design to Minimize Catalyst Light-off Time,» *SAE International*, 2003.
- [93] A. F. C. a. c. Philip G. Blakeman, «Developments In Diesel Emission aftertreatment Technology,» 2003.
- [94] K. O. K. I. K. Hayashi, «Niobium in heat resistance cast steel auto parts,» *Casting Technology Research Lab., Hitachi Metals Ltd.*, nº 11, pp. 321-4367.
- [95] A. R. ., J. M. Enrique Magariño, «Propiedades mecánicas de carburo de silicio poroso de estructura celular abierta,» de *IIIV Congreso de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Gandía, 2002.
- [96] S. A. D. A. R. Adams, *ASM Handbook Composites*, 2001.
- [97] J. B. P. B. J. Bailey, *ASM Handbook Mechanical Testing and evaluation*, vol. 8, 2000.
- [98] D. A. D. A. H. Ackerman, *ASM Handbook Corrosion*, vol. 13, 1987.
- [99] M. N. F. Tholence, «High Temperature Corrosion of Cast Alloys in Exhaust Environments I-Ductile Cast Irons,» *Oxidation of metals*, vol. 69, pp. 13-36, 2008.
- [100] G. Dieter, *Mechanical Metalurgy*, Mc Graw Hill, 1998.
- [101] J. C. F. F Costa Oliveiraa, «Mechanical and thermal behaviour of cordierite–zirconia composites.,» 2001.
- [102] G. L. y. S. S. Quek, *The finite element method*, 2003.